

**efzn**

Energie-Forschungszentrum  
Niedersachsen

## **Jahresbericht 2014/2015**

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)



# Jahresbericht 2014/2015

## Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)

Das EFZN ist eine wissenschaftliche  
Einrichtung der



in Kooperation mit den Universitäten



## Inhaltsverzeichnis

Grußwort der Niedersächsischen Ministerin für Wissenschaft und Kultur	4
Grußwort des Vorsitzenden des Kuratoriums	6
Vorwort des Vorstandes	8
Die Jahre 2014/2015 im Überblick	10
Geschäftsbericht und Infrastruktur	32
Vorstellung strategisch wichtiger Projekte 2014/2015	50
Weiterentwicklung zum gemeinsamen wissenschaftlichen Zentrum und Vorstellung der Energieforschungsknoten	140
Anhang	154

## Grußwort der Niedersächsischen Ministerin für Wissenschaft und Kultur

Sehr geehrte Damen und Herren,

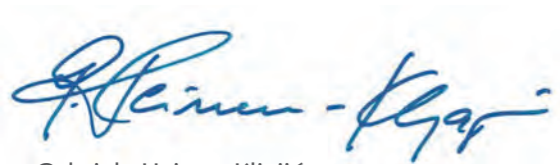
Die konsequente Umsetzung der Energiewende ist entscheidend für das Erreichen der klimapolitischen Ziele und eine nachhaltige Versorgungssicherheit. Wir in Niedersachsen haben diesen Prozess von Anfang an auch als eine ökonomische Chance verstanden und uns in den letzten Jahren eine Vorreiterrolle bei der Erforschung, Bereitstellung und Anwendung regenerativer Energien erarbeitet.

Das Land unterstützt diese Entwicklung durch eine nachhaltige Forschungspolitik, die auch die mittelständische Wirtschaft und die Industrie als wichtige Akteure beim Transfer von Forschungsergebnissen in innovative Produkte im Blick behält. Die Fragen der zukünftigen und klimafreundlichen Energieversorgung müssen dabei in transdisziplinären Forschungsansätzen bearbeitet werden, um den vielfältigen Aspekten von den Natur- und Ingenieurwissenschaften bis zu den Rechts-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften Rechnung zu tragen. Nur so gelangen wir schließlich zu Lösungen, die die gesamte Gesellschaft erreichen und mitnehmen.

Mit der im Jahr 2015 vollzogenen Neustrukturierung des EFZN wird dieser notwendige übergreifende Ansatz noch stärker berücksichtigt. Die Kernaufgabe des EFZN ist die Bündelung und strategische Abstimmung der Energieforschungskompetenzen der Partneruniversitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg auf besonders bedeutsamen Gebieten der anwendungsorientierten Grundlagenforschung.

Durch die neue Struktur werden die Forschungskompetenzen der Partneruniversitäten zusammengeführt und verstärkt. Die Bearbeitung hoch komplexer Fragestellungen zum Umbau des Energiesystems erfolgt so in einem exzellenten Umfeld.

Niedersachsen hat die Ideen und die Kraft, bis zum Jahr 2050 vollständig auf den Einsatz von fossilen Energieträgern und Atomkraftwerken zu verzichten. Die starke Energieforschung im Land leistet dafür einen wesentlichen Beitrag.



Gabriele Heinen-Kljajić  
Niedersächsische Ministerin für Wissenschaft und Kultur



Gabriele Heinen-Kljajić

Niedersächsische Ministerin für  
Wissenschaft und Kultur

„Die Energiewende ist ein elementarer Beitrag für den Klimaschutz, zugleich aber auch ein ökonomischer Impulsgeber. Niedersachsen hat hier – auch und gerade im Bereich der Forschung – eine Vorreiterrolle.“

## Grußwort des Vorsitzenden des Kuratoriums

### Sehr geehrte Damen und Herren,

Übergeordnete Herausforderungen bestimmen immer drängender die in der Energieforschung notwendigen Schwerpunkte in der Zukunft. So ist die Energiewende in Deutschland längst unumkehrbar geworden. Die globalen Klimaveränderungen kann heute jeder, wenn er will, in seinem Alltagsumfeld wahrnehmen. Da die Folgewirkungen dieser deutlichen Veränderungen wegen der langen Zeitskalen heute nicht klar zu Tage treten, ist es umso drängender, die Fragen der verantwortlichen Politik zur Gestaltung der zukünftigen Rahmenbedingungen an die Forschung zu stellen.

Der fachübergreifende Forschungsansatz des EFZN bietet gute Voraussetzungen für neue und wirksame Lösungsansätze. Zumal die über die neue Rahmenvereinbarung intensivierte Zusammenarbeit der fünf Mitgliedsuniversitäten die notwendige Basis bieten kann. Mit der nun beginnenden Diskussion in den neuen Gremien hat das EFZN endlich die Chance, niedersachsenweit und organisationsübergreifend verbindliche Forschungsschwerpunkte und zugehörige Ziele zu erarbeiten.

Die sich abzeichnenden Forschungsschwerpunkte

- Vernetzte Energiesysteme
- Power-to-X (Energiespeicherkonzepte und -technologien)
- Energiekonzepte für zukünftiges Wohnen und zukünftige Mobilität
- Anpassung thermischer Kraftwerke an ein nachhaltiges Energiesystem
- Solarenergie
- Windenergie
- Querschnittsforschung in Materialwissenschaft, Ökonomie und Rechts- und Sozialwissenschaft

bieten allesamt ausgezeichnete zukünftige Betätigungsfelder.

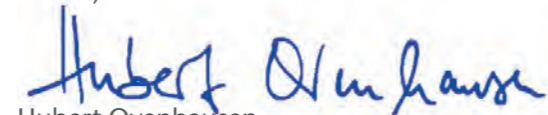
Nach sieben erfolgreichen Jahren des EFZN, insbesondere die Drittmittelentwicklung zeigt die erfreuliche Entwicklung, ist die seit Januar 2016 geltende neue Rahmenvereinbarung zwischen den beteiligten Hochschulen eine ideale Voraussetzung für den notwendigen weiteren Fortschritt:

- Verantwortlichkeiten und Finanzierung sind präzise umrissen
- Der neue Aufsichtsrat kann die Vorgaben der Politik als klare Ziele vorgeben
- Der EFZN-Vorstand kann die dazugehörige Strategie in Augenhöhe mit den Beteiligten erarbeiten und umsetzen
- Der wissenschaftliche Fachbeirat ist als „kritischer Freund“ des EFZN gut für weitergehende Anregungen und ein erfahrener und unabhängiger Begleiter in wissenschaftlichen Fragestellungen
- Der gemeinsame Auftritt in der Öffentlichkeit wird deutlich mehr Wirkung haben
- Der landesweite Einsatz von Mitteln in der Energieforschung wird effizienter
- Die notwendige formale Zusammenarbeit im Forscheralltag barrierefreier

Sowohl durch die stärkere Einbindung von regionalen Unternehmen als auch durch die angestrebte Zusammenarbeit mit anderen erfolgreichen Forschungseinrichtungen wird das EFZN wachsen und an nationaler und internationaler Bedeutung zunehmen.

In diesem Sinne wünsche ich dem neu strukturierten EFZN und seinen Mitarbeitern einen dynamischen Start und viele nachhaltig erfolgreiche Jahre in der Zukunft.

Goslar, im März 2016



Hubert Ovenhausen,  
Vorsitzender des Kuratoriums



Hubert Ovenhausen

Vorsitzender des Kuratoriums

„Der fachübergreifende Forschungsansatz des EFZN bietet gute Voraussetzungen für neue und wirksame Lösungsansätze.“

## Vorwort des Vorstandes

Die Jahre 2014 und 2015 des EFZN standen im Zeichen einer weiteren Expansion bei gleichzeitiger Konsolidierung des Erreichten.

Das EFZN in seiner ursprünglichen Form wies von Anfang zwei „Schönheitsfehler“ auf, die der damaligen Gründungssituation geschuldet waren: Zum einen fehlte eine Forschungshalle, in der die in den vorhandenen Laboren erreichten Ergebnisse – insbesondere im Bereich des Schwerpunktforschungsthemas „Energiespeicher und -systeme“ – in ein höherskaliges praxisnäheres Versuchsstadium umgesetzt werden konnten. Zum anderen war das EFZN, wie noch im Logo dieses Berichtes für die Jahre 2014/2015 zu lesen ist, seit seiner Gründung eine wissenschaftliche Einrichtung der Technischen Universität Clausthal in Kooperation mit der Technischen Universität Braunschweig, der Georg-August-Universität Göttingen, der Leibniz Universität Hannover und der Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, ohne dass hierzu ein im Detail geregeltes Vertragsverhältnis bestand. Gleichwohl sollte im EFZN gemäß seiner ursprünglichen Satzung aus dem Jahr 2006 die Zusammenarbeit der fünf Partneruniversitäten intensiviert werden, um die nationale und internationale Sichtbarkeit der niedersächsischen Energieforschung weiter zu erhöhen. Dies ist jedoch, wie hochschulerfahrene Führungskräfte wissen, kein einfaches Unterfangen, da Universitäten laut Grundgesetz wissenschaftlich autonom sind und zu keiner Kooperation mit anderen Einrichtungen gezwungen werden können. Aus diesem Grund wurde zunächst die genannte Organisationsform gewählt.

Dieser „Schönheitsfehler“ wurde im Berichtszeitraum durch die Unterzeichnung einer gemeinsamen Rahmenvereinbarung zwischen den Präsidien der beteiligten Universitäten geheilt: Das EFZN ist seit dem Jahr 2016 nunmehr ein gemeinsames wissenschaftliches Zentrum aller fünf Universitäten, die jetzt auf „Augenhöhe“ in der

universitären Energieverbundforschung agieren können, was hoffentlich zur gewünschten Intensivierung der Zusammenarbeit führt.

Mit dem Abschluss dieser Rahmenvereinbarung wird die Zielsetzung verfolgt, auf Basis der im EFZN in den Jahren 2008–2015 gemachten Erfahrungen und unter Nutzung der aufgebauten Koordinations- und Forschungsinfrastruktur in Zukunft ein weiterentwickeltes EFZN zu schaffen, das sich maßgeblich auf die Energieforschungsaktivitäten aller fünf Kooperationsuniversitäten stützt. Durch die Zusammenführung dieser Forschungskapazität einer jeden Universität (dort in jeweils sogenannten „Energieforschungsknoten“ organisiert) werden, unter wissenschaftlicher Leitung durch den EFZN-Vorstand und Koordination durch die gemeinsame EFZN-Geschäftsstelle, die energiesystemorientierte Verbundforschung unter dem Dach des EFZN gefördert und gleichzeitig die Forschungsaktivitäten an den Standorten gestärkt. Als weiterer Mehrwert der Kooperation erwachsen Synergiepotentiale durch eine zwischen den Standorten abgestimmte gemeinsame Forschungsstrategie sowie Verbesserungen bei der fächerübergreifenden Lehre und der notwendigen transdisziplinären, systemischen Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Durch die Bündelung der Energieforschungskompetenzen der fünf Universitätsstandorte – und der damit verbundenen Erhöhung der „kritischen Masse“ – wird zudem die Einwerbung gemeinsamer Verbundprojekte auf der nationalen und internationalen Ebene gewährleistet. Die gemeinsame Forschungsinfrastruktur ist damit auf einen organisierten Wissenstransfer in die Praxis der Energiewelt ausgerichtet und offen für weitere Partnerschaften. Schließlich führt die Gestaltung einer gebündelten, strategisch abgestimmten niedersächsischen Energieforschung samt dazu notwendiger Kooperationsstrukturen unter einem Dach zu einer Erhöhung der nationalen und internationalen Sichtbarkeit der niedersächsischen

Energieforschung in Gänze, was der Bedeutung Niedersachsens als Energieland gerecht wird.

Hierzu kann sich der Leser selbst ein Bild machen, indem er die Forschungsthemen und Infrastrukturen der fünf Universitäten – und damit das mögliche Potential – zur Kenntnis nimmt, welche ab der Seite 144 in diesem Bericht beschrieben werden.

Es wird für die Zukunft darauf ankommen, wie viel gut ausgestattete, strategiebildende Energieforschungs-Verbundprojekte eingeworben und mit Erfolg gemeinsam umgesetzt werden können. Nur auf diese Weise kann die erwünschte Zusammenarbeit erfolgen und die in den vergangenen Jahren aufgebaute gemeinsame Infrastruktur effizient genutzt werden. Hierzu gehören unter anderem die zunächst fehlenden, im Berichtszeitraum errichteten Forschungshallen Batterie- und Sensortestzentrum in Goslar (Seite 39), Tiefbohrforschungsanlage „Drilling Simulator“ in Celle (Seite 42) sowie der großtechnische Versuchsstand der Leibniz-Universität Hannover für Aufladesysteme und ORC-Prozesse in Goslar (Seite 46). Die Gesamtinvestitionen für die genannte Forschungsinfrastruktur betragen rund 18 Millionen Euro und stehen nun allen EFZN-Forscherinnen und Forschern zur Verfügung. Diese gemeinsame Infrastrukturnutzung im EFZN ist ein weiterer Vorteil und Mehrwert, die sich aus der neu geschlossenen Rahmenvereinbarung ergeben.

Die ersten Monate des Jahres 2016 haben jedenfalls gezeigt, dass der betriebene Quantensprung im EFZN durch die Umstrukturierung zu einem gemeinsamen wissenschaftlichen Zentrum aller im Logo gezeigten fünf niedersächsischen Universitäten bereits die ersten Früchte trägt, die in diesem Bericht ab Seite 142 nachzulesen sind.

Goslar, im April 2016

Für den EFZN-Vorstand  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck



Hans-Peter Beck



Michael Kurrat



Hans-J. Appelrath



Leonhard Ganzer



Jutta Geldermann



Axel Mertens



Wolfgang Schade

*Amtierender EFZN-Vorstand im Berichtszeitraum.*



## Die Jahre 2014/2015 im Überblick

# 1

*Besuch der Niedersächsischen Landesregierung anlässlich einer Karbinettssitzung im EFZN im November 2014.*

## Das Jahr 2015 im Überblick (Auswahl)



### November 2015: Weichenstellung für Neustrukturierung des EFZN

Die Mitgliedsuniversitäten des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) richten an ihren jeweiligen Standorten „Energieforschungsknoten“ unter Heraushebung von eigenen Forschungsschwerpunkten ein, die unter dem Dach des EFZN gebündelt und strategisch abgestimmt werden. Geregelt wird die Neustrukturierung des EFZN in einer Rahmenvereinbarung, die von allen Präsidien der Partneruniversitäten unterzeichnet wurde. Danach ist das EFZN nunmehr ein gemeinsames

wissenschaftliches Zentrum der Universitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg. Die EFZN-Geschäftsstelle hat ihren Sitz weiterhin am Standort Goslar.

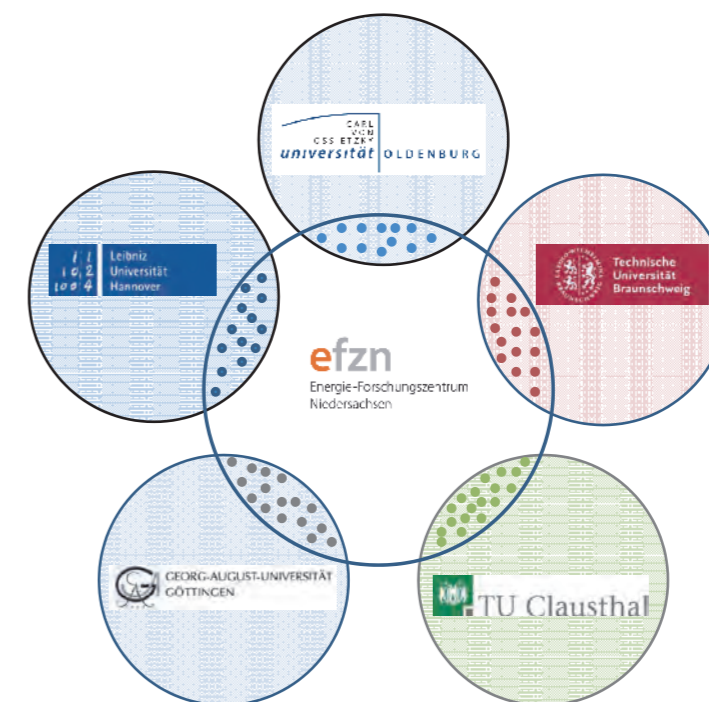
„Wir rücken noch enger zusammen, um die Forschungskompetenzen und die Forschungsinfrastrukturen der fünf Universitäten für die anstehenden Aufgaben bei der Umstellung des Energiesystems noch effektiver zu nutzen“, erklärt

Professor Hans-Peter Beck, der für eine Amtszeit von zwei Jahren zum Sprecher des neuen Vorstandes gewählt wurde. Stellvertretender Vorstandssprecher ist der Oldenburger Professor Carsten Agert. Komplettiert wird der nun fünfköpfige Vorstand mit Frau Professor Jutta Geldermann (Universität Göttingen) sowie den Professoren Michael Kurrat (TU Braunschweig) und Axel Mertens (Universität Hannover).

Die Umsetzung der EFZN-Neustrukturierung wird durch die Vorstandsmitglieder, die zugleich auch die Sprecher der jeweiligen Energieforschungsknoten der Partneruniversitäten sind, geleitet. Gemäß Rahmenvereinbarung ist dabei das Einvernehmen mit dem neu eingesetzten Aufsichtsrat herzustellen, der aus jeweils einem Präsidiumsvertreter der Mitgliedsuniversitäten und des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur besteht. Die Kernaufgabe des EFZN besteht auch weiterhin darin, die Energieforschungskom-

petenzen der Partneruniversitäten aus den Bereichen Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie Rechts-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften auf besonders bedeutsamen Gebieten der anwendungsorientierten Grundlagenforschung dauerhaft zu bündeln und strategisch abzustimmen. Mit der neuen Struktur werden die Forschungskompetenzen der Partneruniversitäten gestrafter zusammengeführt. Dadurch soll die Bearbeitung von Fragestellungen beim Umbau des Energiesystems hin zur Nachhaltigkeit erfolgen, die durch einzelne, disziplinär orientierte Forschungseinrichtungen über nur temporäre Forschungsverbände nicht im erforderlichen Maße geleistet werden kann.

Kriterien für die ergebnisorientierte Umsetzung einer transdisziplinären Forschungsmethode sind die Tiefe der erreichten fachübergreifenden Wissensintegration theoretischer Forschungsinhalte und ihr Transfer in die Praxis.



Dezentrale Energieforschung an den fünf Universitäten sowie Verbundforschung im gemeinsamen Energie-Forschungszentrum Niedersachsen.



## November 2015: Pumpspeicher-Tagung auf dem EnergieCampus in Goslar

„Wir sitzen auf einer Menge Energie“, mit diesen Worten eröffnete Prof. Wolfgang Busch Ende November die mittlerweile dritte Pumpspeicher-Tagung des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN). Diesmal kamen rund 60 Fachleute im Batterietestzentrum auf dem EnergieCampus in Goslar zusammen.

Der Leiter des Instituts für Geotechnik und Marktscheidewesen der TU Clausthal ist zugleich der Initiator der zweitägigen Veranstaltung. „Der etwas provokante Titel der Tagung „Pumpspeicher für die Energiewende – Spitzentechnologie auf Eis?“, ist mit Bedacht gewählt“, so Professor Busch. Denn der derzeitige Stillstand bei Pumpspeicherprojekten stehe im Kontrast zu ihrer Funktion als idealer Partner der Energiewende.

Dem stimmte Michael Lindenthal, Leiter der Abteilung Energie, Klimaschutz im Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz in seiner Eröffnungsansprache zu. Das bisherige Geschäftsmodell der Pumpspeicher funktioniere nicht mehr und eine Anpassung der Marktmechanismen sei dringend erforderlich, fasste der Politiker in seiner Rede zusammen. Es ginge sogar soweit, dass Betreiber bestehender Anlagen die Stilllegung anmeldeten, wie zum Beispiel in Nordrhein-Westfalen. Dennoch dürfe diese Technologie nicht ungenutzt bleiben, da sich so viel Potential dahinter verberge. Eine Mög-

lichkeit sehe er in der Verpachtung der Kapazität der Pumpspeicher an Betreiber von erneuerbaren Energieanlagen oder gar einer Zuordnung von Speichern zum Netz. Dazu bedarf es jedoch eines neuen regulativen Rahmens. Michael Lindenthal berichtete von der Initiative der Landesregierung eben diesen regulativen Rahmen zu prüfen und zu verbessern. Er appellierte auch an den Teilnehmerkreis der Konferenz aus Wissenschaft und Industrie sich weiterhin für die „Spitzentechnologie Pumpspeicher“ zu engagieren.

Professor Thomas Hanschke begrüßte die Fachleute in seiner Doppel-Funktion als Präsident der TU Clausthal und als Vorsitzender des neuen EFZN-Aufsichtsrates. Er betonte in seiner Rede, wie wichtig die Pumpspeichertechnologie für ein stabiles Stromnetz sei, da zum Beispiel Witterschwankungen auf diese Weise ausgeglichen werden könnten. Er verwies auf die lange Tradition in der Nutzung von Wasserkraft als Antriebsenergie in der Bergbau-Region Harz. Neben diesem historischen Bezug seien aber auch aktuelle Erfolge, wie das kürzlich unterzeichnete „Memorandum of Understanding“ zwischen der südafrikanischen North-West University und dem EFZN mit Blick auf gemeinsame Forschungsaktivitäten – einem neuartigen Konzept untertägiger Pumpspeicherung, bei dem die Grund- und Grubenwasser-Haushaltung integraler Bestandteil ist – eng verknüpft mit den Themen dieser Konferenz.



## Oktober 2015: EFZN baut Forschungskooperation mit Südafrika aus

Die North-West University (NWU) und das EFZN streben gemeinsame Forschungsaktivitäten unter anderem auf dem Gebiet der untertägigen Pumpspeicher an. Im Rahmen einer Delegationsreise der Niedersächsischen Landesregierung unter Leitung von Umwelt- und Energieminister Stefan Wenzel nach Südafrika, an der seitens des EFZN-Vorstands Professor Carsten Agert und Professor Hans-Peter Beck teilnahmen, unterzeichneten beide Seiten eine Absichtserklärung („Memorandum of Understanding“). Neben dem Sprecher

des EFZN-Vorstandes, Prof. Hans-Peter Beck, unterschrieb der Vizekanzler der NWU Prof. Dan Kgwadi in der Residenz des deutschen Botschafters Walter Johannes Lindner in Pretoria. Darüber hinaus wurden die bestehenden Kontakte zum „Council for Scientific and Industrial Research“ (CSIR), eine der führenden Forschungs- und Entwicklungsorganisationen Afrikas, vertieft. Thema waren hier unter anderem mögliche Forschungsprojekte zur Stromversorgung entlegener Gebiete mit Erneuerbaren Energien.

## Oktober 2015: Drilling Simulator Celle – Versuchsbetrieb angelaufen

An der EFZN-Forschungseinrichtung „Drilling Simulator Celle“ (DSC) haben im Oktober die ersten Kundenprojekte begonnen. Langfristig verfolgt der DSC mit seiner Forschung das Ziel, Tiefbohrungen auf Erdöl, Erdgas und Geothermie sowie unterirdische Speicher kostengünstiger und sicherer zu machen.

In den vergangenen Monaten gelang es bereits, zwei von der Industrie beauftragte Projekte für den DSC zu akquirieren. Mit den beiden Projekten, die von zwei lokalen Vertretern internationaler bohrtechnischer Dienstleister vergeben wurden, ist im Oktober begonnen worden. In einem Fall handelt es sich um ein Gemeinschaftsprojekt mit dem Institut für Technische Mechanik der TU Clausthal, Projektleiter ist Professor Gunther Brenner. Die Arbeit beinhaltet Tätigkeiten im Bereich der computerbasierten Strömungssimulation, die hauptsächlich am Institut in Clausthal durchgeführt, aber vom DSC mit betreut werden. Das zweite Projekt ist deutlich praktischer ausgerichtet. Hier werden am Drilling Simulator in Celle in der sogenannten

„Flow Loop“ in waagerechter Bohrführung experimentelle Untersuchungen bzw. Messungen an Modulen neu entwickelter Untertage-Bohrsysteme durchgeführt. Zwar ist die „Flow Loop“ derzeit noch nicht komplett aufgebaut; die bereits vorhandene Ausrüstung gestattet es aber, den Prüfling mit einer Fließrate von 2.000 Litern pro Minute zu durchströmen und mit entsprechenden Sensoren Messungen durchzuführen.

„Die aktuellen Kundenprojekte sind zwar umfangsmäßig noch recht begrenzt. Entsprechende Erweiterungen und langfristige Beauftragungen erscheinen jedoch realistisch“, so Professor Joachim Oppelt, Leiter des DSC. Mit weiteren Firmen der einschlägigen Industrie laufen Gespräche über neue Projekte, auch unter Einbeziehung des Software-Simulators. Darüber hinaus wurde mit dem Beantragen öffentlich geförderter Projekte begonnen. Im Zusammenhang mit den zusätzlichen öffentlichen und privaten Projekten soll mittelfristig auch die Zahl der Mitarbeiter am DSC deutlich gesteigert werden.



## September 2015: 8. Niedersächsische Energietage

Der Titel der 8. Niedersächsischen Energietage (net2015), die inhaltlich von einer transdisziplinär besetzten Programmkommission gestaltet und organisatorisch vom EFZN ausgerichtet wurden, lautete: „Energimärkte im Spannungsfeld zwischen Staat, Bürger und Wettbewerb“. Dazu hatten sich rund 200 Experten zusammengefunden.

In seiner Begrüßungsansprache betonte der EFZN-Vorstandsvorsitzende Professor Hans-Peter Beck, dass das Thema Marktdesign im Strombereich hochaktuell sei und insbesondere ein Marktmechanismus für die Erhaltung der Versorgungssicherheit, die für die Erhaltung der Arbeitsplätze ein hohes Gut wäre, fehle. Hierfür müsse eine Lösung geschaffen werden. In der anschließenden Plenarveranstaltung standen nach kurzen Impulsvorträgen in diesem Jahr erstmals Diskussionen der Plenarredner unter Einbeziehung des Publikums zu den Themen „Wieviel Staat brauchen Energimärkte?“ und „Stiefkind Wärmemarkt – warum kommen wir da nicht voran?“ auf dem Programm.

In seinem Abendvortrag gab Niedersachsens Umwelt- und Energieminister Stefan Wenzel als Schirmherr der diesjährigen Energietage zunächst einen Überblick über die politischen Herausforderungen der Energiewende. Diese sei in Deutschland gesellschaftlicher Konsens, auch wenn es bei der Umsetzung, wie zum Beispiel dem Ausbau der notwendigen Infrastruktur, im Detail noch Konfliktpunkte gebe. Die Niedersächsischen Energietage sieht der Minister hier als eine hervorragende Plattform, um die verschiedenen Akteure zusammen zu bringen.

Die Energiewende, so wurde im Schlussforum einvernehmlich seitens der anwesenden Fachleute festgestellt, sei unumkehrbar. Allerdings sollte als Triebkraft nicht nur der Klimaschutz dienen, sondern auch die Nutzung heimischer Ressourcen unter Effizienz Gesichtspunkten und die Schaffung neuer zukunftsweisender Produkte und Systeme zur Erhaltung der Arbeitsplätze in der Industrieland.

## September 2015: Neuer Schub für deutsch-chinesische Energieforschung

Wissenschaftler der TU Clausthal und Vertreter der Volksrepublik China haben am EFZN eine neue Einrichtung ins Leben gerufen: das Sino-German-Energy-Research-Center. Dieses Büro bildet künftig für Forscher und Unternehmen eine Anlaufstelle in Hinblick auf Forschungskooperationen beider Länder.

Mit der Einrichtung des Büros wird auch ein weiterer Baustein zur European North Sea Energy Alliance (ENSEA) hinzugefügt, in die die Provinz Sichuan im Juni 2015 während der vierten chinesisch-deutschen Energiekonferenz in Chengdu aufgenommen wurde. ENSEA ist ein EU-gefördertes Kooperationsvorhaben, das sich mit der Verteilung und Speicherung von Energie befasst. Partner sind Nordseeanrainerregionen aus Dänemark, Deutschland, den Niederlanden, Norwegen und Schottland sowie als Region aus einem Nicht-EU-Staat eben die chinesische Provinz Sichuan. Das EFZN ist der wissenschaftliche Partner im nieder-sächsischen ENSEA-Cluster.

Der Gründung des neuen Büros vorausgegangen war ein Workshop zum Thema „Deutsch-Chinesische Forschungskooperation“. Clausthals Universitätspräsident Professor Thomas Hanschke und der EFZN-Vorsitzende Professor Hans-Peter Beck begrüßten dazu auch Zuoqian Xie, den ersten Sekretär für Wissenschaft und Technologie der chinesischen Botschaft in Berlin, sowie aus Hamburg Lou Liaofan, Vizeregierungskonsul der Volksrepublik China.

Die Vertreter aus dem Reich der Mitte gaben einen Überblick über die guten Beziehungen zwischen beiden Ländern sowie über das chinesische Forschungsfördersystem und die laufenden wissenschaftlichen Kooperationen mit Deutschland. Derzeit würden bilaterale Forschungsplattformen für die Bereiche „Sauberes Wasser“, „Elektronik“ und „Mobilität“ unterstützt. Die deutsche Energiewende werde als Vorbild für China und das EFZN als kompetenter Partner auf diesem Gebiet betrachtet.



## Juli 2015: EFZN macht Schüler für IdeenExpo fit

Wie wurde der Oberharzer Wald für den Bergbau genutzt? Wie entwickelte sich die Nutzung vom 15. Jahrhundert bis heute? Und wie passt das mit der aktuellen Energiewende zusammen? Mit diesem Thema beschäftigten sich vier Schüler vom Goslarer Christian-von-Dohm-Gymnasium (CvD) während eines Praktikums am EFZN. Ihr Wissen konnten sie final auf der IdeenExpo 2015 in Hannover weitergeben.

Für die CvDler Kim-Julia Schönfelder, Sophie Götz, Deniz M. Öztürk und Robert Kruckow hieß es neun Tage lang an einem der europaweit größten Events für Kinder und Jugendliche zum Thema Naturwissenschaft und Technik teilzunehmen: der IdeenExpo in Hannover. Ihnen zur Seite stand Dipl.-Ing. Frank Mattioli vom EFZN, der bereits die Vorbereitung des Themas im Praktikum übernommen hatte.

Insgesamt 351.000 Besucher kamen in diesem Jahr zur IdeenExpo auf das Messegelände der Landeshauptstadt. Darunter auch Bundestagsabgeordnete Dr. Daniela De Ridder, die sich von den Jungen und Mädchen am EFZN-Stand ganz genau die Oberharzer Wasserwirtschaft zur Umleitung und Speicherung von Wasser als nachhaltiges Energieversorgungssystem erklären ließ. Das System, das Wasserräder in den Bergwerken des Oberharzer Bergbaus antrieb, gilt mittlerweile als eines der weltweit bedeutendsten vorindustriellen Wasserwirtschaftssysteme des Bergbaus und wurde 2010 zum UNESCO-Weltkulturerbe erklärt.

Auf der IdeenExpo 2015 waren laut Veranstalter 230 Aussteller mit mehr als 600 Exponaten vertreten, außerdem wurden rund 650 Workshops angeboten. Die Ausstellungsfläche vergrößerte sich 2015 auf mehr als 100.000 Quadratmeter.

## Mai 2015: Erste Dialogplattform „Power to Heat“

Zum ersten Mal veranstaltete das Energie-Forschungszentrum Niedersachsen in Kooperation mit dem Clausthaler Umwelttechnik-Institut (CUTEC) und der Landesinitiative Energiespeicher und -systeme die Dialogplattform „Power to Heat“. Etwa 100 Teilnehmer kamen für zwei Tage nach Goslar und nutzten die Gelegenheit, sich vertiefend mit dem Thema auseinander zu setzen.

„Power to Heat ist ein wichtiges Thema, weil ein gesunder Mix aus verschiedenen Speichertechnologien mit der Energiewende einhergehen muss und Strom immer mehr zur Primärenergie wird“, sagte EFZN-Chef Professor Hans-Peter Beck zur Eröffnung. „Wir brauchen diese Technologie und auch den Austausch zwischen Forschung und Industrie, um Forschungs- und Entwicklungsprojekte, Demonstrationsvorhaben und wissen-

schaftliche Begleitforschungen zur Auswirkung von „Power to Heat“ auf das Energieversorgungssystem und den Klimaschutz zu initiieren.“

Unter „Power to Heat“ wird die Nutzung von Strom zur Bereitstellung von Wärme und Kälte, aber auch Regelenergie als eine Systemdienstleistung verstanden. Dabei wird Strom genutzt, der zu sehr günstigen Preisen angeboten wird und/oder aus regenerativen Energiequellen stammt und wegen Netzrestriktionen nicht aufgenommen werden kann, um Netzdienstleistungen für die Stabilität des Stromversorgungssystems bereitzustellen. „Power to Heat“ ist somit auch ein Konzept zur Optimierung von Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung und konventionellen Anlagen zur Wärmebereitstellung aus elektrischer Energie.



## April 2015: 7. Göttinger Energietagung

Etwa 200 Teilnehmer konnten am 28. April zur bereits 7. Göttinger Energietagung in der Paulinerkirche in Göttingen begrüßt werden, die vom EFZN in Kooperation mit der Bundesnetzagentur jährlich veranstaltet wird. Die Vertreter von Unternehmen, Verbänden, Beratungsunternehmen, Behörden und Wissenschaft tauschten sich zwei Tage lang zum Thema: „Bilanzkreissystem – Herzstück des Wettbewerbs und der Versorgungssicherheit“ aus.

Um einen funktionierenden Wettbewerb im Strommarkt vor dem Hintergrund uneingeschränkter Versorgungssicherheit zu ermöglichen, werden die Stromeinspeisungen und -auspeisungen in das öffentliche Netz in sogenannten Bilanzkreisen saldiert. Die einem Bilanzkreis zugeordneten Ein- und Auspeisemengen sollen möglichst in jeder Viertelstunde des Jahres ausgeglichen sein. Grundprobleme sowie Optimierungsfragen dieses komplexen Systems, dem im heutigen liberalisierten Energiemarkt eine he-

rausragende Bedeutung zukommt, bildeten den Gegenstand der Vorträge und Diskussionen. Sowohl Übertragungsnetzbetreiber und Stromverteilernetzbetreiber als auch Stromhändler, Lieferanten und Energiedienstleister sowie schließlich die Bundesnetzagentur als Regulierungsbehörde brachten ihre jeweiligen Erfahrungen und Vorstellungen zum Ausdruck.

Professor Hartmut Weyer, Direktor des Instituts für deutsches und internationales Berg- und Energierecht der TU Clausthal und Koordinator des Forschungsbereichs Energierecht am EFZN, zog ein positives Fazit: Die stetig wachsende Teilnehmerzahl der Tagung seit ihrer erstmaligen Durchführung zeige, dass es gelinge, für aktuelle Fragen der Energiewirtschaft eine akzeptierte Diskussionsplattform bereitzuhalten. „Das Bilanzkreissystem ist ein Thema von großer Detailtiefe, doch konnten wir hochqualifizierte Referenten gewinnen und einen intensiven Austausch mit fachkundigen Teilnehmern ermöglichen“, so Weyer.

## April 2015: Hannover Messe: Forscher ziehen positive Bilanz

Die Hannover Messe in der Landeshauptstadt ist für das EFZN wichtig, um sich immer wieder ins Gespräch zu bringen und neue Kontakte zu knüpfen. Dies ist auf der Hannover Messe 2015, der weltweit bedeutsamsten Industriemesse, einmal mehr deutlich geworden. Maschinenbauer, Physiker und Energieforscher haben eine Woche lang ihre Innovationen vorgestellt.

Diplom-Ingenieur Frank Mattioli, der das EFZN zusammen mit Masterstudentin Laura Pook in

Hannover repräsentierte, unterstrich vor allem die kommunikative Komponente: „Man trifft sich, tauscht sich aus und bespricht mögliche neue Projekte. Vernetzung ist ganz wichtig, deshalb sind wir auf der Messe vertreten und zeigen Flagge.“

Unweit des EFZN komplettierte das Clausthaler Umwelttechnik-Institut (CUTEC) den Auftritt der hiesigen Forscher auf der Messe. Das CUTEC stellte das Modell eines Wellenkraftwerks aus.



## April 2015: Batterie- und Sensoriktestzentrum offiziell eingeweiht

Mehr als 150 Gäste kamen am 10. April zur offiziellen Einweihung des Batterie- und Sensoriktestzentrums (BST) auf den Goslarer EnergieCampus. Zu den Festrednern gehörten auch Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel und Fraunhofer-Vorstand Professor Alexander Verl.

„Dies ist mein Anteil beziehungsweise Mosaikstein für die Entwicklung der Region und ich hoffe, dass dadurch weitere Initiativen in und um Goslar folgen werden“, mit diesen Worten begrüßte Bauherr und Brandschutz-Unternehmer Dr. Jochen Stöbich die rund 150 Gäste. Knapp zwei Millionen Euro kostete der Neubau des Technikumgebäudes, finanziert als Private Partnership der Stöbich Gruppe, die Inneneinrichtung wurde mit weiteren 2,5 Millionen Euro aus EU-Töpfen (EFRE), sowie Mitteln der Fraunhofer Gesellschaft, der TU Clausthal und mittelständischen Unternehmen finanziert.

„Batteriespeicher werden in Zukunft im deutschen Strommarkt eine zentrale Rolle spielen. Fortschritte, die wir hier in der Forschung erzielen können, erlauben unser Stromsystem flexibler zu machen und Schwankungen auszugleichen, die durch die Einspeisung von erneuerbaren Energien entstehen. Als gebürtiger Goslarer sehe ich es mit großem Stolz wie hier in der Region der Wissenschaftsstandort durch das neue Batterie- und Sensoriktestzentrum auf dem EnergieCampus gestärkt wird“, sagte Bundesminister Sigmar Gabriel.

Das Batterie- und Sensoriktestzentrum (BST) wird vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) und der Goslarer Außenstelle des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts (HHI) gemeinsam betrieben. In dem 1800 Quadratmeter großen Gebäude ist neben den technischen Einrichtungen zukünftig auch die Goslarer Fraunhofer Außenstelle untergebracht. Neben der Entwicklung und

der Herstellung neuer Materialien und Sensoren für Anwendungen in Industrie, Medizin und Energietechnik werden in dem Technikum unter anderem Grenzbelastungstests an Batterien, Kurzschlussversuche und Temperaturfeldmessungen vorgenommen. „Wir wollen die Forschung insbesondere im Bereich der Sicherheit der Batteriesysteme und anderen Energiespeichern mit vorantreiben“, erklärte EFZN-Chef Professor Hans-Peter Beck. „Die vielseitigen Kompetenzen und das wissenschaftliche Know-how von EFZN und Fraunhofer ergänzen sich ideal und werden in diesem Zentrum gebündelt.“ Gemeinsam mit dem Leiter der Goslarer HHI-Außenstelle, Professor Wolfgang Schade, wurde den Besuchern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Bevölkerung das Zentrum im Detail vorgestellt. „Im Vordergrund unserer Arbeiten steht die Umsetzung wissenschaftlicher Ergebnisse in Anwendungen der realen Welt, um diese unserer Gesellschaft nutzbar zu machen“, erläuterte Professor Schade. „Wir wollen mit diesen Ideen neue Unternehmensgründungen initiieren und so einen signifikanten Beitrag zur Schaffung neuer Arbeitsplätze und zur zukünftigen regionalen Entwicklung liefern.“

Das BST verfügt als ein Alleinstellungsmerkmal über zwei Brandprüföfen mit Abgasreinigung und integrierter Abgasanalytik für Versuche an Batteriespeichersystemen und neuartigen Schutzhüllen für Heimspeicheranlagen. Neben den elektrischen Prüfständen für Batteriezell- und modultests, können auch komplexe Batteriesysteme mit bis zu 1,2 MW Leistung unter klimatisierten Bedingungen extrem schnell be- und entladen werden. Ergänzt wird das Angebot durch faseroptische Messsysteme zur Erfassung von thermischen und elektrischen Zustandsgrößen sowie einer Echtzeit-Analytik der entstehenden Brandgase. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Funktionalisierung von Materialien mit Hochleistungslasern zur Herstellung neuartiger Sensoren und Schlüsselkomponenten für die Energietechnik – insbesondere zur effizienten Herstellung von Wasserstoff als speicherbaren Energieträger. Dazu überreichte Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel einen Förderbescheid des BMWi über 2,9 Millionen Euro an das Goslarer Fraunhofer HHI, mit dem am BST in den kommenden drei Jahren eine entsprechende Prototypenanlage entwickelt und aufgebaut werden soll.



### Februar 2015: Winter School 2015: Praxisnah und aktuell

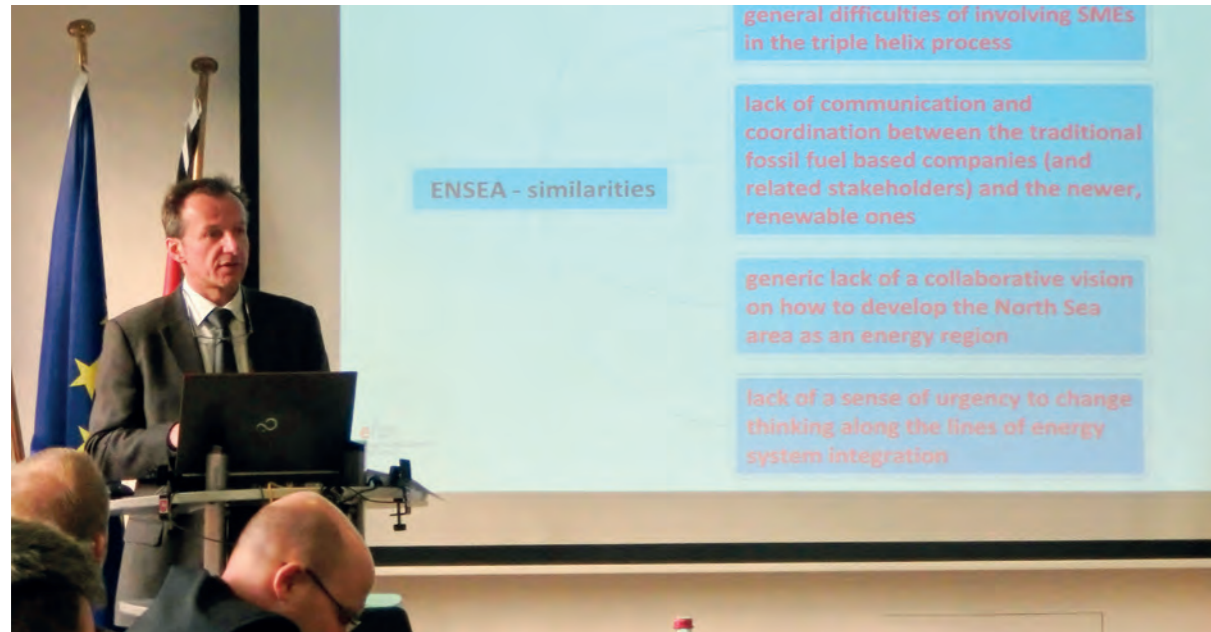
Aus verschiedenen Universitäten kamen 41 Studenten zur Niedersächsischen Energiespeicher Winter School 2015 nach Goslar. Eine Teilnehmerin reiste sogar aus Dänemark an, um fünf Tage am EFZN mit Experten die aktuellen Themen der Speicher- und Systemtechnologie zu bearbeiten. Am Ende gab es ein Zertifikat für jeden.

„Wir freuen uns, dass sie da sind.“ Mit diesen Worten begrüßte Professor Hans-Peter Beck, Leiter des EFZN, die jungen Frauen und Männer auf dem EnergieCampus und fügte noch einen ganz speziellen Tipp hinzu: „Seien sie fleißig und lernen sie viel, denn die Energiewende braucht Fachkräfte.“ Im Rahmen der Winter School berichten Experten aus erster Hand über Praxiswissen und Lösungsansätze. Es werden die aktuellen Themen der Speicher- und Systemtechnologie im Detail beleuchtet und die dafür erforderlichen Grundlagen der

Stromerzeugung, Speichertechnologien, Auswirkungen auf die elektrischen Netze, sowie der Energietechnik vermittelt. Dazu wird theoretische Wissensvermittlung mit praktischen Überblicken zu einem Gesamtangebot aus Theorie, Systemaufbau und Systemintegration verbunden. Angesprochen sind insbesondere Studierende im Hauptstudium und Doktorand(en)innen technischer und naturwissenschaftlicher Fachrichtungen.

Recht zufrieden zeigten sich die Organisatoren Professor Heinz Wenzl (TU Clausthal) und Karolina Koring (EFZN) am Ende der Woche: „Die Studenten haben nicht nur neues Wissen erlangt, sondern konnten dies auch praxisnah in einem Planspiel zum Stromhandel festigen.“ Doch es wurde nicht nur gelernt, während des Freizeitprogramms hatten die jungen Leute auch Zeit sich kennenzulernen und neue Kontakte zu knüpfen.

## Das Jahr 2014 im Überblick (Auswahl)



### November 2014: Internationaler ENSEA-Workshop mit Europäischer Kommission in Brüssel

Auf Einladung des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) trafen sich Ende November das ENSEA (European North Sea Energy Alliance)-Konsortium mit Vertretern der Europäischen Generaldirektionen Energie, Forschung & Innovation und Mare sowie einem Vertreter des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU) in der Niedersächsischen Landesvertretung in Brüssel.

Der internationale Workshop, moderiert von Dr. Knut Kappenberg (EFZN-Projektentwickler Internationale Angelegenheiten), diente der Vorstellung und der Eruiierung von Kooperationsmöglichkeiten zwischen dem niedersächsischen Cluster im ENSEA-Verbund, seinen Partnern und den Brüsseler Generaldirektionen. Nach einer einführenden Begrüßung unter Darstellung der niedersächsischen Positionen zur Energiewende und zu Kooperationsmöglichkeiten innerhalb des Nordseeraumes

durch Dr.-Ing. Dr. rer. nat. Magnus Buhlert (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz), stellten Dr. Wolfgang Dietze (EFZN), Carolin Schuback (Wachstumsregion Ems-Achse e.V.) und Dr.-Ing. Jens zum Hingst (Clausthaler Institut für Umwelttechnik, CUTEC) die Aktivitäten und Strategien ihrer jeweiligen Institutionen vor.

Anschließend berichtete Dr. Knut Kappenberg über die bisher erreichten Resultate sowie die weiteren Vorhaben des ENSEA-Verbundes im Hinblick auf gemeinsame Flaggschiffprojekte und eine organisatorische Weiterentwicklung des Konsortiums. Der zweite Teil des Workshops befasste sich mit der Vorstellung der Aktivitäten der anwesenden Generaldirektionen. Dabei wurde das Thema Energiesystemintegration rund um die Nordsee aus verschiedenen Blickwinkeln dargestellt: Energie, Forschung und Innovation sowie Raumplanung für maritime Räume.

### November 2014: Niedersachsens Landeskabinett tagt im EFZN

Statt in Hannover tagte das Landeskabinett von Ministerpräsident Stephan Weil am 4. November in Goslar. Hinter verschlossenen Türen des Multimediarooms des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) wurden die einzelnen Tagesordnungspunkte abgearbeitet.

EFZN-Chef Professor Hans-Peter Beck bekam im Anschluss an die Sitzung die Gelegenheit, der niedersächsischen Landesregierung unter anderem die Forschungsschwerpunkte des Zentrums vorzustellen. Ihm schloss sich Professor Martin

Faulstich an. Der Geschäftsführer des CUTEC-Instituts in Clausthal-Zellerfeld ist der Vorsitzende des Sachverständigenrates der Bundesregierung für Umweltfragen. Die Vorträge fanden unter Ausschluss der Medien und Öffentlichkeit statt.

Nach dem offiziellen Part besichtigte das Kabinett das neue Batterie- und Sensoriktestzentrum auf dem EnergieCampus. Wissenschaftler vom EFZN, der TU Clausthal und dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut stellten ihre Arbeiten vor und standen für Fragen zur Verfügung.



## September 2014: Workshop Umsetzungsfragen zur Bundesfachplanung Übertragungsnetz

Der Forschungsbereich Energierecht des EFZN veranstaltete im Leibnizhaus in Hannover erstmalig einen Workshop zu Fragen der Energiewende. Über 50 Teilnehmer aus den Bereichen Politik, Behörden, Netzbetreiber, Beratungsunternehmen und Anwaltskanzleien sowie Wissenschaft diskutierten „Umsetzungsfragen der Bundesfachplanung Übertragungsnetz“. Durchgeführt wurde die Veranstaltung vom Direktor des Instituts für deutsches und internationales Berg- und Energierecht der TU Claustal, Professor Hartmut Weyer, und dem Inhaber des Lehrstuhls für Öffentliches Recht, insbesondere Verwaltungsrecht, der Universität Göttingen, Professor Thomas Mann.

Der Ausbau der Übertragungsnetze ist ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Transformation des Stromversorgungssystems hin zu erneuerbaren Energien. Das neu eingeführte Instrument der Bundesfachplanung soll unter verstärkter Öffentlichkeitsbeteiligung den zügigen Netzausbau

erleichtern. Der Termin der Veranstaltung war gut gewählt, da bereits im August 2014 das erste Verfahren der Bundesfachplanung zu einer Höchstspannungsleitung von Bertikow in Brandenburg nach Pasewalk in Mecklenburg-Vorpommern eingeleitet worden war.

Die Vorbereitungen und ersten Erfahrungen mit dem neuen Instrument der Bundesfachplanung wurden von der verfahrensleitenden Bundesnetzagentur und einem Übertragungsnetzbetreiber dargestellt. Weitere Referenten gaben die Sicht des Landes Niedersachsen, eines Umweltverbandes, eines Kommunalverbandes sowie einer beratenden Anwaltskanzlei wieder. Insgesamt wurden die Möglichkeiten des Instruments der Bundesfachplanung positiv bewertet. In Einzelfragen zeigten sich aber durchaus unterschiedliche Einschätzungen, etwa zur Berücksichtigung raumordnerischer Belange, zur Möglichkeit der Erdverkabelung und zur Notwendigkeit gesetzgeberischer Nachbesserungen.



## Juli 2014: Niederländische und EFZN-Forscher vertiefen Zusammenarbeit

Im Rahmen des Besuches von Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel und dessen niederländischen Amtskollegen Henk Kamp im neuen Batterie- und Sensoriktestzentrums, haben das EFZN, Energy Valley Groningen und die Energy Academy Europe ein „Memorandum of Understanding“ unterzeichnet. Ziel dieser Absichtserklärung ist die bestehende Zusammenarbeit im Bereich Energiespeicherung und Systemintegration Erneuerbarer Energien zu vertiefen.

„Das Papier ist ein Ausdruck für die bereits bestehende große Nähe zwischen den Niederländern und der niedersächsischen Energieforschung“, sagte Professor Hans-Peter Beck, Vorsitzender des EFZN. „Ihre Kompetenzen sind komplementär zu unseren. Während die Niederländer durch ihre reichen Erdgasvorkommen besonders in diesem Feld spezialisiert sind, ist Deutschland und beson-

ders Niedersachsen in der Nutzung regenerativer Energien führend.“

Die Rollen der Partner werden somit klar definiert sein: Das Know-How der EFZN-Forscher wird für die Entwicklung und Erprobung regenerativer Small-Scale Energiespeicherkraftwerke genutzt. Das Batterie- und Sensoriktestzentrum soll erweitert werden, um mit Echtzeitsimulationen den Nutzen der Miniaturanlagen zu testen. Die niederländischen Partner werden sich im Gegenzug der „Power to Gas“-Forschung (Umwandlung von elektrischer Energie in verwertbare Gase, zum Beispiel durch Elektrolyse) und „Small-Scale“ Energiespeichern widmen. Die Ergebnisse der Zusammenarbeit sollen zukünftig als Grundlage zur Entwicklung eines „North Sea Power Rings“ (Verknüpfung der Stromnetze der Nordsee-Anrainerstaaten) dienen.



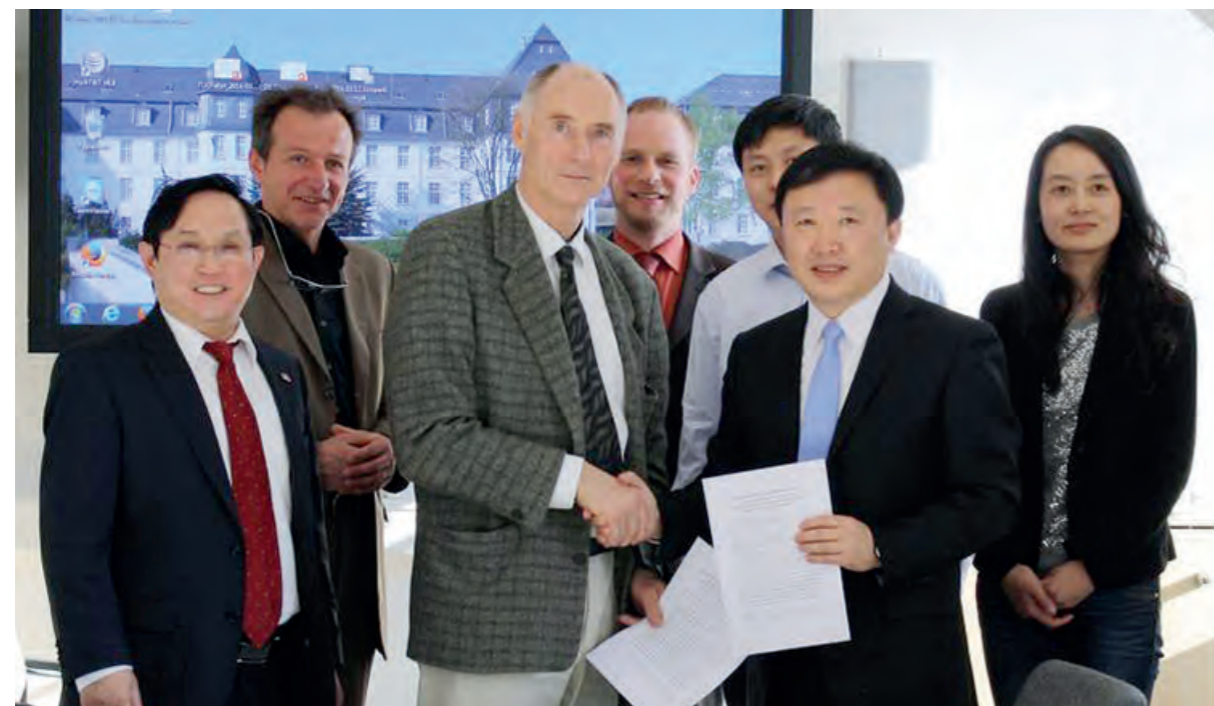
## März 2014: Zusammenarbeit zwischen EFZN und Deutsch-Chinesischer Ökopark Qingdao

Das EFZN und das Verwaltungskomitee des Deutsch-Chinesischen Ökoparks Qingdao haben ein „Memorandum of Understanding“ für die Dauer von drei Jahren unterzeichnet. Die gemeinsame Absichtserklärung bildet die Grundlage für eine angestrebte Kooperation, deren zentraler Bestandteil es sein soll, Forschungsthemen zu identifizieren und diese zu gemeinsamen Projekten weiterzuentwickeln.

Der Ökopark Qingdao ist ein von der deutschen und der chinesischen Regierung unterstütztes Modellprojekt zur nachhaltigen Stadtentwicklung. Ziel des Projektes ist es, in der ostchinesischen Küstenstadt Qingdao einen ökologischen Gewerbepark zu errichten. Innerhalb der nächsten zehn Jahre sollen auf der über elf Quadratkilometer großen Gesamtfläche des Parks energieeffiziente Wohn- und Gewerbeimmobilien für 60.000 Ein-

wohner entstehen. Ein Forschungsschwerpunkt des Projektes ist das Themenfeld Umwelt- und Energietechnik. So wird unter anderem geplant, die auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung des Parks über ein dezentralisiertes intelligentes Energienetzwerk zu koordinieren.

Als Auftakt für die Zusammenarbeit zwischen dem EFZN und dem Ökopark Qingdao soll von chinesischer Seite eine Forschungsergebnistransferplattform entwickelt werden, die unter anderem den gegenseitigen Austausch mit Forschungsinstitutionen und der Wirtschaft in China dienen soll. Das EFZN ist im Gegenzug eingeladen, sich bei der geplanten „Qingdao Ecopark Umwelttechnologie-Messe“ gemeinsam mit dem Ökopark in einem „Deutsch-Chinesischen Forum für Umwelttechnologie im Bereich der Erneuerbaren Energien“ zu engagieren.



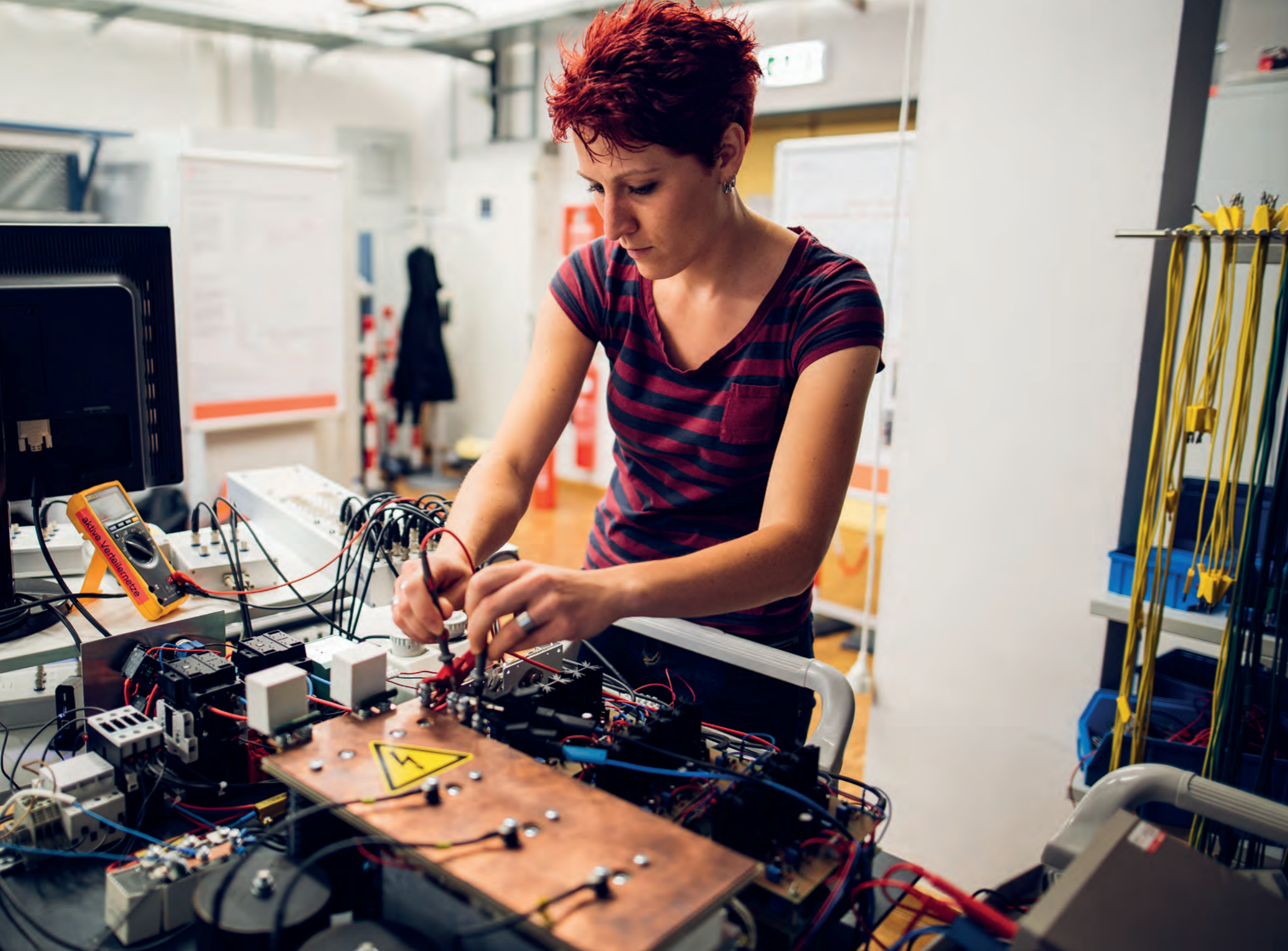
## März 2014: EFZN und Beauftragter für regionale Landesentwicklung Braunschweig im Dialog

Die Chancen für die Region durch die besondere Rolle des EFZN waren das Thema des Besuchs des Landesbeauftragten für regionale Landesentwicklung Matthias Wunderling-Weilbier in Goslar. Seit Jahresbeginn ist der ehemalige Helmstedter Landrat mit der Ermittlung von Entwicklungspotenzialen beschäftigt. Als einer von vier Landesbeauftragten in Niedersachsen soll er die Region Braunschweig stärken und EU-Mittel gezielt einsetzen helfen. Zentrale Themen sind Tourismus, Bauplanung und Infrastruktur.

„Die Forschung ist ein wichtiger Baustein, um Fördergelder in die Region zu ziehen“, betonte Wunderling-Weilbier. Dabei sieht er das EFZN auf Grund seiner Bündelungsfunktion für die niedersächsische Energieforschung in einer besonderen Rolle: „Die europäische Union nimmt keine Städte oder Landkreise ins Blickfeld, sondern Regionen. Das EFZN entwickelt eine Strahlkraft, die mittler-

weile in ganz Niedersachsen und darüber hinaus wahrnehmbar ist.“ Der Vorsitzende der Einrichtung, Professor Hans-Peter Beck, bestätigte diese Sichtweise und betonte, dass das EFZN auf Grund seiner Außenwirkung seit Jahren helfe, EU-Fördergelder in die Region zu holen.

Über den Etat für die Entwicklungsförderung Südostniedersachsens sagte Wunderling-Weilbier: „Es wird nicht im Gießkannenprinzip vorgegangen, sondern es werden gezielt Projekte finanziert, die weitere Investitionen oder Fördergelder für die Region anziehen können.“ In diesem Zusammenhang zeigte er besonderes Interesse an den Projekten „Energieeffizienzoptimierung öffentlicher Gebäude“, „Geothermie in stillgelegten Bergwerken“ und „Untertägige Pumpspeicher“, die ihm unter Federführung der Professoren Giorgia Falcone und Wolfgang Busch von der TU Clausthal vorgestellt wurden.



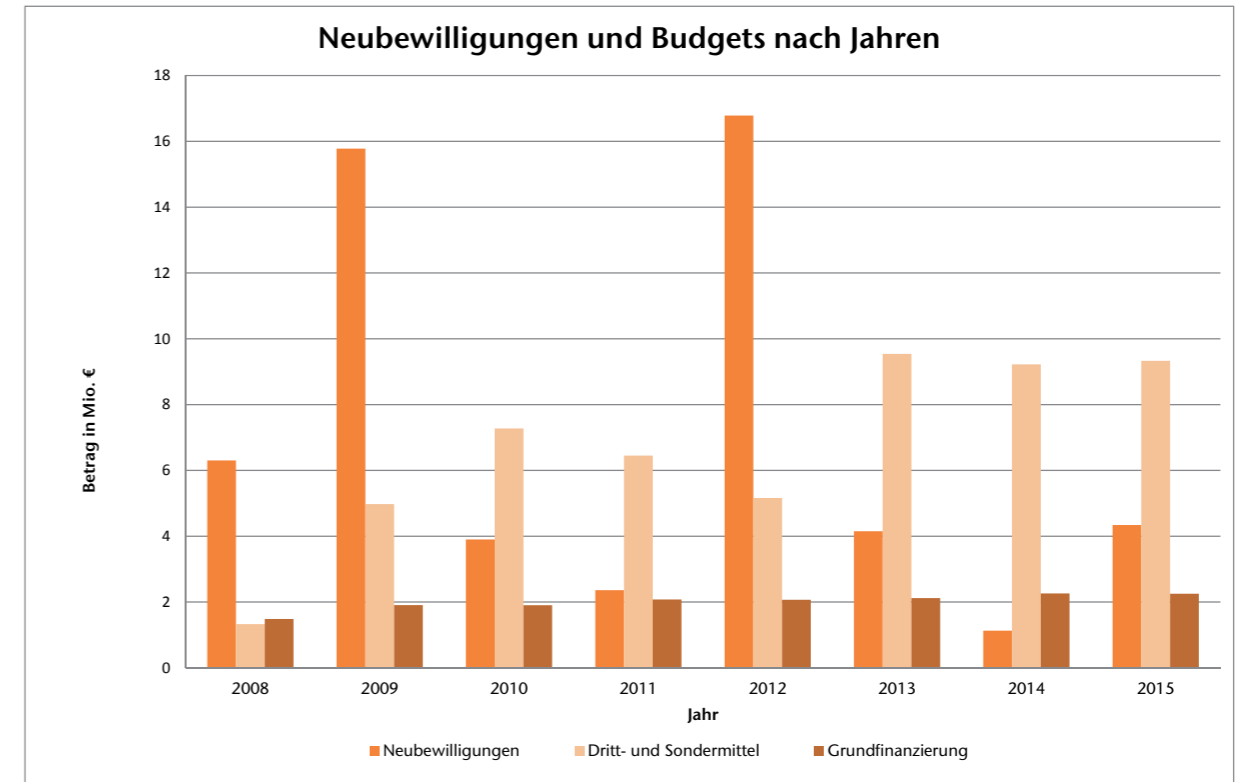
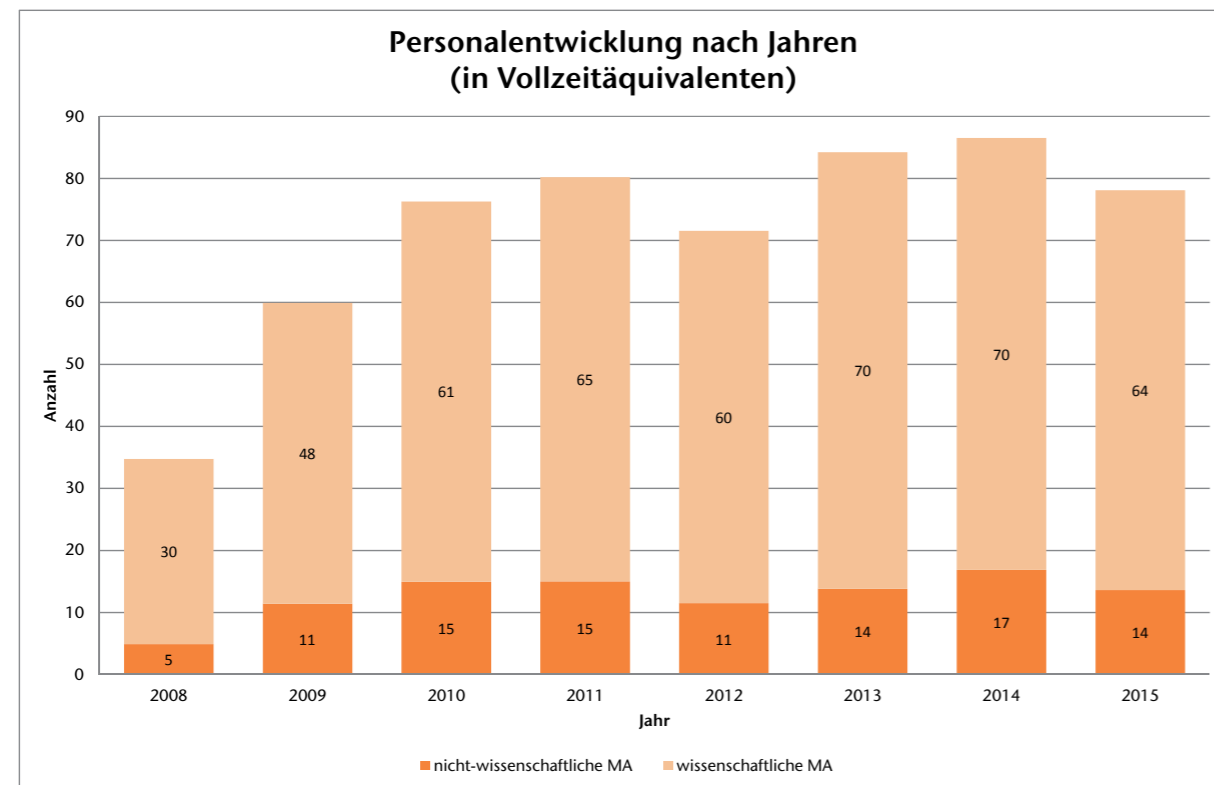
## Geschäftsbericht und Infrastruktur

# 2

## Geschäftsbericht und Infrastruktur 2014/2015

Die Jahre 2014 und 2015 standen im Zeichen der Fertigstellung der bereits in den Vorjahren bewilligten Infrastrukturmaßnahmen an den EFZN-Standorten Goslar und Celle. So konnte auf dem EnergieCampus Goslar im Sommer 2014 der neuerrichtete Hallenbau des „Batterie- und Sensoriktestzentrums“ vom EFZN und der Abteilung Faseroptische Sensorsysteme des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institutes in Goslar bezogen und die Beschaffung der aus Mitteln der EFRE-Förderung des Landes Niedersachsen finanzierten Forschungsgeräte für das Batterietestzentrum des EFZN erfolgreich abgeschlossen werden. Im Laufe des Jahres 2015 wurde in der neuen Forschungs-

halle mit dem Aufbau des „Geomechanischen Labors“ für die grundlagenorientierte Forschung im Bereich der energiewirtschaftlichen Nutzung des geologischen Untergrundes (zum Beispiel Tiefengeothermie, Untertage-Energiespeicher) begonnen. Kernstück dieser aus Eigenmitteln des EFZN finanzierten Ausstattung ist ein Triaxialprüfstand zur Simulation der thermo-hydro-mechanisch-chemischen (THMC) Geoprozesse in großen in-situ-Teufen unter extremen thermischen, hydraulischen und mechanischen Bedingungen (bis 250 Grad Celsius in 4.000 bis 6.500 Metern). Hiermit können in Modellversuchen zum Beispiel geothermale Stimulations- und Produktionsvor-



gänge unter in-situ-Bedingungen nachgebildet und anschließend numerisch modelliert werden. Die resultierenden mathematischen Modelle werden anschließend in die Arbeiten am Drilling Simulator Celle integriert und für die Modellierung von Tiefbohrprozessen weiterverwendet.

Darüber hinaus wurde im Berichtszeitraum auch in den Außenanlagen des EFZN eine Forschungsinfrastruktur aufgebaut. So wurden bereits vor Fertigstellung des „Batterie- und Sensoriktestzentrums“ im Rahmen des BESIC-Projektes die vergleichenden Untersuchungen an zwei Hochleistungs-Lithium-Ionen-Energiespeichern unterschiedlicher Bauart durchgeführt. Im Herbst 2014 begann der Aufbau des von der Leibniz Universität Hannover betriebenen „Versuchsstandes für Aufladesysteme“, welcher unter anderem aus Mitteln der EFRE-Förderung des Landes Niedersachsen finanziert wurde. Dieser neuerrichtete Versuchsstand ermöglicht Forschungsprojekte speziell im Bereich der Aufladung von Brennstoffzellen und Downsizing-Verbrennungsmotoren sowie der Erforschung und

Weiterentwicklung von elektrischen Verdichtersystemen und Organic-Rankine-Cycle (ORC) Anlagen zur Restwärmenutzung. Zum Ende des Jahres 2015 nahm zudem eine im Rahmen des „Schaufenster Elektromobilität“ geförderte Schnellladesäule für Elektrofahrzeuge ihren Betrieb auf.

Für den Aufbau dieser zusätzlichen Forschungsinfrastruktur auf dem EnergieCampus Goslar in den Jahren 2014/2015 stand ein Gesamtinvestitionsvolumen von knapp 7,5 Millionen Euro zur Verfügung.

Am neuen Standort Celle konnten im Sommer 2014 die aus Mitteln der EFRE-Förderung des Landes Niedersachsen finanzierten Bauarbeiten zur Errichtung der Gebäudestruktur für den „Drilling Simulator Celle“ (DSC) erfolgreich abgeschlossen werden. Insbesondere aufgrund äußerst günstiger Ausschreibungsergebnisse sowie einer Optimierung des Baukörpers wurden im Baubereich Einsparungen von deutlich über eine Million Euro realisiert, welche größtenteils zur Erweiterung

der betriebstechnischen Ausstattung für die wissenschaftlichen Großgeräte verwendet werden konnten. Mit einem Anfang des Jahres 2015 vollzogenen Wechsel in der wissenschaftlichen Leitung des DSC ging eine Anpassung des wissenschaftlich-technischen Konzepts der Einrichtung einher. Zur Jahresmitte 2015 wurden vom Land Niedersachsen die bereits in Aussicht gestellten Fördermittel für die Großgeräteausstattung sowie die Finanzierung der laufenden Kosten in der fünfjährigen Anlaufphase der Forschungseinrichtung zur Verfügung gestellt. Die Fertigstellung der wissenschaftlichen Grundausstattung soll zum Jahresende 2016 erfolgen. Parallel dazu lief der Forschungsbetrieb mit ersten Projekten bereits in der zweiten Jahreshälfte 2015 an.

### Forschungsaktivitäten

Auch in den Jahren 2014 und 2015 konzentrierten sich die Forschungsarbeiten am EFZN auf die drei Forschungsschwerpunkte „Energiespeicher und -systeme“, „Tiefengeothermie“ sowie „Materialwissenschaftliche Energieforschung“. Eine Auswahl profilbildender Forschungsarbeiten wird an anderer Stelle in diesem Bericht vorgestellt. Herauszuheben sei hier der Abschluss der Forschungsarbeiten im niedersächsischen Forschungsverbund „Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik – gebo“ Ende des Jahres 2014. Mit bereits in Aussicht gestellter Unterstützung des Landes Niedersachsen sowie Industriepartnern sollen die grundlagenorientierten Ergebnisse dieses Verbundes in einem weiteren Schritt im Rahmen eines am Drilling Simulator in Celle durchgeführten Transfervorhabens nunmehr in erste industrielle Anwendungen überführt werden. Neben den genannten Forschungsaktivitäten wurden die grundlagenorientierten als anwendungsorientierte Forschungsarbeiten im Bereich der Entwicklung neuartiger elektrochemischer Energiespeicher weiter intensiviert.

### Die wissenschaftliche Ausstattung des Zentrums

Die bauliche Herrichtung eines bereits vorhandenen historischen Gebäudes auf dem heutigen EnergieCampus Goslar sowie die Einrichtung des

EFZN mit wissenschaftlichen Geräten wurden in den Jahren 2008 bis 2011 ausschließlich aus Mitteln des Landes Niedersachsen finanziert. Die Stadt Goslar hatte als Eigentümerin des Geländes dem Land Niedersachsen 2006 ein Gebäude im Wege einer Erbbaurechtsbestellung kostenlos für 90 Jahre überlassen. Das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur stellte der TU Clausthal rund 12,3 Millionen Euro für den Aufbau des EFZN zur Verfügung. Darin enthalten waren mehr als 3,5 Millionen Euro für wissenschaftliche Geräte, um hiermit die geplanten Forschungsschwerpunkte zu stärken und von Beginn an drittmittelfähig zu machen. Darüber hinaus wurden aus Mitteln für die allgemeine Ersteinrichtung des EFZN 280.000 Euro für die Grundausstattung einer wissenschaftlichen Bibliothek verwendet.

### Labor „Aktive Verteilnetze“

Der in dem Labor für „Aktive Verteilnetze“ vorhandene Prüfstand ist eine Nachbildung eines elektrischen Verteilnetzes (Niederspannungsnetz) mit hohem Anteil dezentraler, regenerativer Einspeisung. Der Versuchsstand ermöglicht die Untersuchung der Auswirkungen auf den sicheren Netzbetrieb, die durch vermehrten Einsatz leistungselektronischer Komponenten wie zum Beispiel PV-Wechselrichter verursacht werden. Für diese Untersuchungen stehen folgende Geräte zur Verfügung: Zwei Maschinensätze (jeweils eine Asynchronmaschine gekoppelt mit einer Synchronmaschine), die sowohl als Last als auch als Generator eingesetzt werden können,



zwei hochdynamische und frei konfigurierbare Wechselrichter zur Nachbildung verschiedenster Erzeuger und Lasten, eine PV-Außenanlage und zusätzliche ohmsche und motorische Lasten. In einem aktuellen Projekt wird das Versuchsnetz zudem mit einstellbaren Netzersatzelementen (Leitungsnachbildungen) zum Nachbilden verschiedener Netzstrukturen ergänzt.

### Speicherlabor



Das Speicherlabor wird zur Konzeptentwicklung und Untersuchung von Energiespeichersystemen mit unterschiedlichen Technologien verwendet. Zur Verfügung stehen Blei-Säure-Batterien (450V–650V, 40Ah), Doppelschichtkondensatoren (250V–500V, 5F), ein Schwungmassenspeicher (600V–800V, 6MJ), Elektrolyt- und Snubberkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien (300V–450V, 24Ah) sowie eine Redox-Flow-Batterie (10 kW, siehe Bild), die in das hauseigene Energieversorgungssystem eingebunden ist. Dieses System kann den hohen Leistungsanforderungen im Zeitbereich von wenigen Mikrosekunden bis zu etwa einer Stunde gerecht werden. Es steht zudem eine elektronische Belastungseinheit zur Verfügung, mit der Speichertechnologien bidirektional mit bis zu 200kW dynamisch getestet werden können.

### Chemielabore

Forschungsgeräte in den fünf elektrochemischen und materialwissenschaftlichen Laboren sind zwei große Redox-Flow-Prüfstände, ein Zink-Luft-Prüfstand (Eigenbau) und eine Handschuhbox.

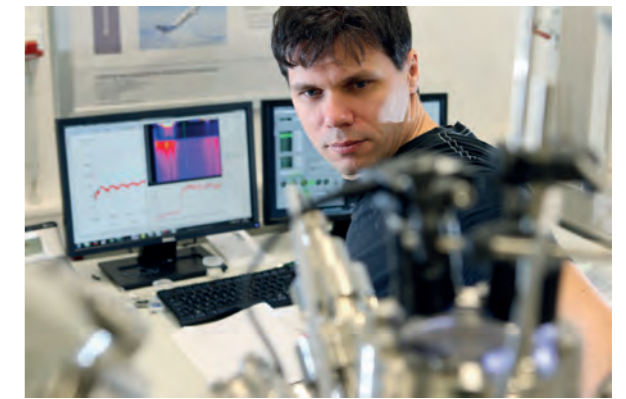


Im Bereich der Brennstoffzellenforschung stehen ein Direkte-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) Prüfstand, zwei kleinere Prüfstände für DMFC (Eigenbau) und ein Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) Prüfstand zur Verfügung. Darüber hinaus gibt es einen Druckelektrolyseur zur Versorgung zum Beispiel der Brennstoffzellen im Langzeittest mit Wasserstoff.

Der Aufbau des modernen Prüfstandes für die Aufladung von Brennstoffzellen und die Hochaufladung von Downsizing-Motoren soll zukünftig anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben auf dem Gebiet der Aufladung von Verbrennungsmotoren, Brennstoffzellen und Batterien ermöglichen.

### Physiklabore

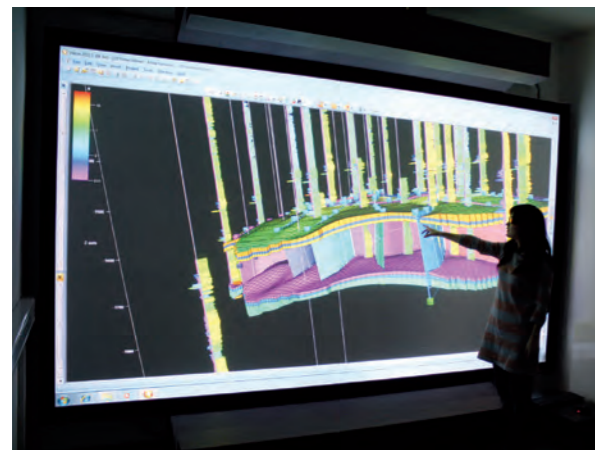
In den physikalischen Laboren befindet sich ein Femto-Sekunden-Laser (fs-Laser) zur maßgeschneiderten Modifikation von Materialien. Damit



ist es zum Beispiel möglich, Wellenleiter und photonische Strukturen direkt ins Glas zu schreiben. Weiterhin wird mit dem fs-Laser schwarzes Silizium für die Prozessierung von Solarzellen hergestellt. Zur weiteren Bearbeitung stehen Handschuhbox, Beschichtungsanlage, ein Excimerlaser zur Pulsed Laser Deposition (PLD) und ein Bondinggerät zur Kontaktierung bereit. Materialanalysen sind mittels Sekundärionenmassenspektroskopie (SIMS) möglich. Außerdem steht ein Solarcharakterisierungslabor zur Verfügung.

### 3D-Visualisierungsraum

Weiterhin wurde am EFZN ein System zur dreidimensionalen Darstellung eingerichtet. Die VR-Wall („VR“ steht für „Virtual Reality“), die in einem eigenen Raum installiert wurde, ermöglicht Studenten und Wissenschaftlern, die dritte Dimension in ihre Untersuchungen mit einzubeziehen. Vier Beamer, die durch einen eigenen Rechner angesteuert werden, projizieren ein Bild auf eine spezielle Leinwand. Mittels 3D-Brillen können die Betrachter dann ein dreidimensionales Bild sehen. Speziell in der Lagerstättenkunde ist das von großem Vorteil, da die Ingenieure so die Bohrungen optimal platzieren können. Ein anderes Anwendungsgebiet ist die dreidimensionale Darstellung von Strömungen in Gesteinen, die zuvor mittels Computertomographie dreidimensional gescannt und digital rekonstruiert wurden: zum Beispiel „Digital Rock“, Pumpspeicher unter Tage und Raumordnung unter Tage. Auch andere



Fachbereiche nutzen dieses Labor zur Visualisierung von räumlichen Daten.

### Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im EFZN – Energielabor im praktischen Betrieb

Das EFZN wird über ein Blockheizkraftwerk (BHKW) mit zugeordneter Absorptions-Kältemaschine mit Strom, Wärme und Kälte versorgt. Das System entspricht dem Ansatz der Dezentralisierung der Strombereitstellung mit direkter Nutzung der Abwärme in angeschlossenen Gebäuden (auch im Sommer). Das BHKW mit den Leistungsdaten 210 kW thermisch/150 kW elektrisch wird mit Erdgas betrieben und versorgt das Gebäude im Heizbetrieb mit Abwärme aus der Stromproduktion. Im Sommerbetrieb wird die Abwärme in einer Absorptions-Kältemaschine zur Bereitstellung von 70 kW Kälteleistung genutzt.

Die auf dem Niveau von 6/12 Grad Celsius verfügbare Kälte dient zur Kühlung der EDV-Räume, der Laserlabore sowie des Gebäudes. Die Kältebereitstellung im Gebäude erfolgt hierbei über als innovative Heiz- und Kühlflächen ausgeführte Radiatoren mit Taupunktregelung. Zur Harmonisierung des BHKW-Betriebes sind für die Verlängerung der Laufzeiten je ein 6-m<sup>3</sup>-Wärmespeicher und ein 3-m<sup>3</sup>-Kältespeicher der Wärme- beziehungsweise Kälteerzeugung und Kälteverteilung zwischengeschaltet. Über die zum Kältespeicher umgenutzte ehemalige Löschwasserzisterne stehen weitere 190 Kubikmeter Speichervolumen auf dem Gelände zur Verfügung. Ziel der Organisation des Anlagenbetriebes ist die Wärme-, Kälte- und Strombereitstellung bei minimiertem Einsatz von fossilen Energien und Emissionen.

Zur wissenschaftlichen Begleitung des Betriebes des Energieversorgungssystems steht ein Monitoring-System zur Verfügung, über das alle Energieströme sowie Betriebsituationen erfasst werden. Die Zentrale der Energieversorgung wird damit zum Labor mit real betriebener Anlagentechnik. Die Energieversorgung des EFZN setzt damit Maßstäbe hinsichtlich moderner Organisation der Energieversorgung und bietet Potential zur Optimierung von Betriebsstrategien in der Praxis.

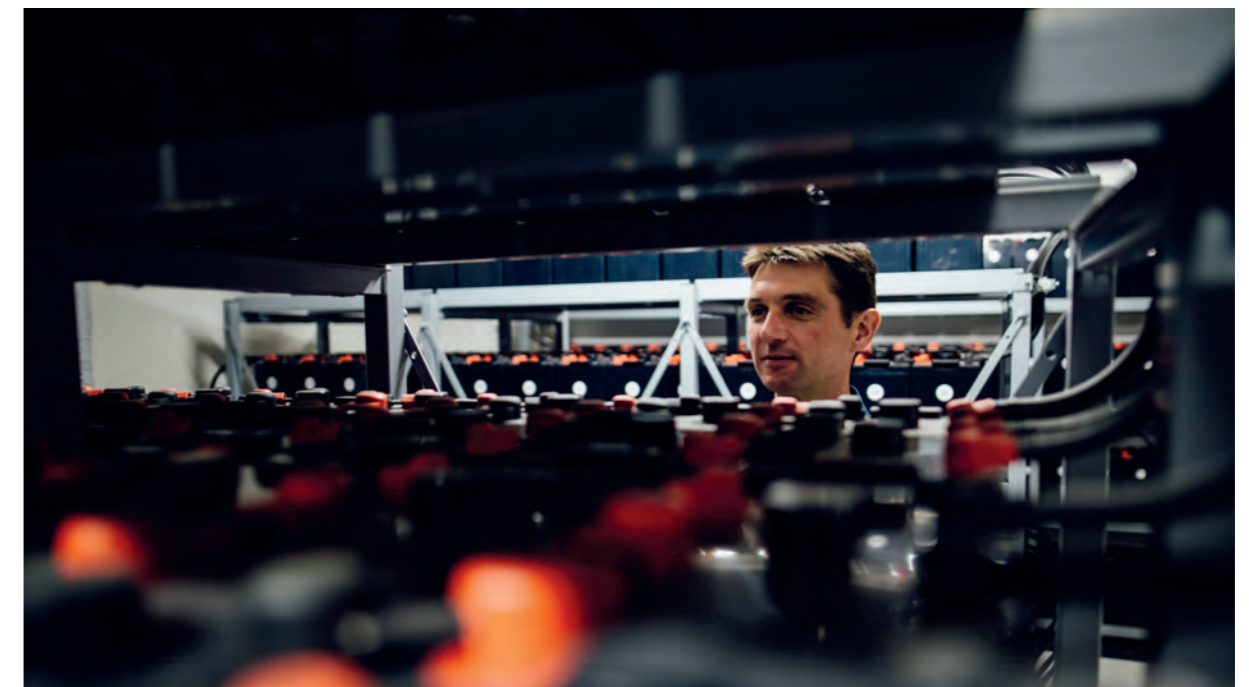
## Batterie- und Sensoriktestzentrum

Im Batterie- und Sensoriktestzentrum (BST) arbeitet das Energie-Forschungszentrum Niedersachsen zusammen mit mehreren Forschungseinrichtungen. Es geht darum, eine Forschungsinfrastruktur zum Testen von großen Batterien aufzubauen, welche hinsichtlich ihrer Leistung bundesweit einmalig ist und die Möglichkeit schafft, auch für die Zukunft gewappnet zu sein, wenn Batterien für Busse und LKW nichts Ungewöhnliches mehr sind.

Batterien, insbesondere für Elektromobilität, unterliegen sehr hohen Anforderungen bezüglich der Energie- und Leistungsdichte. Deshalb werden hochintegrierte Lösungen gefordert. Aus der hohen Energie- oder Leistungsdichte ergeben sich auch hohe abzuführende Wärmequellendichten, die ein besonders gut durchdachtes Thermomanagement erfordern. Insbesondere in Grenzbereichen, wie zum Beispiel dem Schnellladen von Batterien

oder bei hohen dynamischen Belastungen und gleichzeitig hohen oder sehr tiefen Umgebungstemperaturen sind anspruchsvolle Anforderungen an das Batterie- und Thermomanagement gegeben. Zusätzlich ist das Verhalten von Batterien im Extremfall (Einwirkung von hohen Temperaturen aufgrund von hohen Ladeströmen oder auch Unfallbränden) von Interesse.

In dem geförderten Vorhaben errichteten die Verbund- und Kooperationspartner ein Testzentrum, welches die Kompetenzen der Partner bei der Charakterisierung und Untersuchung von Batterien hinsichtlich ihrer elektrischen und thermischen Eigenschaften bei extremen Belastungen bündelt. Dabei sind völlig neue Testmöglichkeiten entstanden, die im Hinblick auf thermische und elektrische Belastungen sehr weit gehen. Folgendes Angebot an Prüfständen mit zugehörigen Belastungsszenarien steht im Fokus des BST:



1. Elektrische Belastungstests bis 1000 V und 1.200 A (gleichzeitig), wobei Brandentstehung geduldet wird. Dazu wurde ein Leistungsprüfstand angeschafft, welcher in dieser Dimension einmalig ist. Der Prüfstand hat Stromanstiegszeiten von 10 auf 90 Prozent in unter 3 ms. Außerdem ist er flexibel auf zwei Kanäle mit jeweils 600 kW Leistung aufteilbar. Der Wirkungsgrad ist größer als 92% und die Kanalauzeichnungen des Prüfstands sind im 10 ms Bereich möglich. Die Spannungen können von 15 bis 1.000 V mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  V eingestellt werden. Die Ströme sind von 0 bis 1.200 A einstellbar, wobei die Genauigkeit bei 1,2 A liegt.
2. Zum Prüfstand wurde ein Spannungsmesssystem mit 320 Kanälen mit einer Summenabtastrate von 20 kHz von jeweils 16 Kanälen angeschafft. Die Kanäle sind untereinander bis 1.000 V galvanisch getrennt. Dabei kann der

Messbereich in Dekaden von 10 V bis 1.000 V in vier Bereiche eingeteilt werden. Mit dieser Anlage ist also eine Einzelzellüberwachung von einer Batterie mit 320 Zellen möglich.

3. Realisiert werden die großen Leistungen des Prüfstandes innovativ über eine Bleipufferbatterie, sodass das Netz nicht belastet wird und hohe Energie- beziehungsweise Leistungspreise vermieden werden können. Dazu wurde eine Batterie mit 400 Zellen und 800 kWh Energiegehalt angeschafft, welche bis zu 960 kW Leistung für circa 20 Minuten bereitstellen kann. Vorteil der Batterie ist, dass Leistungspreise für 960 kW bei etwa 50.000 Euro pro Jahr liegen würden und sich die Batterie dadurch schon nach wenigen Jahren allein auf Grund des Leistungspreises rechnet. Hinzu kommt die effiziente Nutzung und Einsparung der Energie, denn wenn Batterien bis an ihr Lebensdauerende durch Lade- und Entlade-

zyklen getestet werden sollen, so können das bei heutigen Batterien 3.000 Zyklen sein. Bei aktuellen Fahrzeugbatterien mit etwa 20 kWh Energiegehalt ergeben sich so 60.000 kWh pro Batterie, die nicht aus dem Netz bezogen werden müssen, sondern zwischen dem Prüfling und der Pufferbatterien hin und her geschoben werden können.

4. Neben der elektrischen Seite wurde ein Gasmesssystem angeschafft, mit welchem verschiedene Gase nachweisbar sind. So können CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HCN, HCL, HF, NO und H<sub>2</sub> mit Ausnahme von CO<sub>2</sub> alle mit Nachweisgrenzen von unter 10 ppm gemessen werden. Dabei handelt es sich um Messungen im Abgasstrom des Ofens, um die Brandgase analysieren zu können.
5. Weiter wurde ein faseroptisches Temperaturmesssystem angeschafft, welches 300 Messstellen zeitgleich messen kann. Diese 300 Messstellen befinden sich in 50 Glasfasern, die in die Zwischenräume der Zellen eingebracht werden können. Der große Vorteil liegt zum einen in der geringen Größe der Sensoren, zumal diese die Dicke eines Haars aufweisen. Somit können sie quasi in jedes bestehende System nachgerüstet werden. Ein weiterer Vorteil ist die Immunität gegen elektromagnetische Felder, da lediglich mit Licht gemessen wird und Licht elektrisch neutral ist, kann es nicht durch elektromagnetische Felder beeinflusst oder verfälscht werden. Dies ist gerade bei großen Strömen wichtig, welche große Magnetfelder erzeugen. Die Abtastrate des Systems liegt bei 1 Hz und die Temperaturgenauigkeit bei  $\pm 1$  °C. Ein Temperaturbereich von -30 bis 300 Grad Celsius kann auf jeden Fall abgedeckt werden. Wahrscheinlich ist noch viel mehr möglich.
6. Schließlich wurde ein Klimacontainer angeschafft, mit welchem es dank einer Größe von 3,0 m x 3,0 m x 2,3 m möglich ist, auch größere Fahrzeugbatterien einem Klima auszusetzen. Dabei handelt es sich also nicht nur um Temperatureinflüsse sondern auch um die zugehörige Luftfeuchte. Die Luftfeuchte ist von 5 bis 95 Prozent einstellbar und die Temperatur mit einer Temperaturänderungsrate von 1 K pro Minute von -30 bis 85 Grad Celsius regelbar.



Der Klimacontainer ist brandgeschützt ausgeführt und verfügt über eine Stickstofflöscheinrichtung.

7. Zur Untersuchung von Einzelzellen gibt es einen FuelCon Prüfstand mit 16 Kanälen mit jeweils 6 V und 25 A und einem Kanal mit 6 V und 400 A. Zudem sind 8 Kanäle beliebig von 25 A bis 200 A zu einem Kanal kombinierbar. Ebenfalls enthalten sind zwei brandgeschützte, wassergekühlte Prüfkammern. Mit ihm können Einzelzelltests abgedeckt werden. Ein Modulprüfstand ist ebenfalls schon vorhanden und für den Test von großen Batterien dient der Leistungsprüfstand, sodass alle Batteriegrößen abgedeckt werden können.
8. Schließlich gibt es einen großen Brandofen, welcher mit Innenmaßen von 3,0 m x 3,0 m x 2,5 m den Abbrand von ganzen Batterien ermöglicht, zumal eine entsprechende Abgasreinigungsanlage vorhanden ist. Der Ofen ist bis über 1300 Grad Celsius temperaturstabil und eine Einheizung von über 2 MW mit Erdgas ist möglich. Mit diesem Ofen können Einheitstemperaturkurven abgefahren werden.

Mit zugehörigen weiteren Accessoires wie Strom-, Spannungsmesstechnik und Wärmebildkameras wurde mit dieser Ausstattung eine Testinfrastruktur geschaffen, die bundesweit einmalig ist und weiter Bereiche zur Batteriesystemerprobung ermöglicht.



## Drilling Simulator Celle

Der Drilling Simulator Celle (DSC) stellt ein wesentliches Element zur Verstärkung der Forschungsarbeiten des in 2014 erfolgreich abgeschlossenen niedersächsischen Forschungsverbundes „Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik – gebo“ dar. Diese Forschungseinrichtung der TU Clausthal stellt eine Außenstelle des EFZN am Standort Celle dar, dem Zentrum der deutschen Bohr- und Geothermie-Industrie. Aufgabe des DSC ist es, die Realisierung der „Energiewende“ durch Hochtechnologie-Forschung im Bereich der kostengünstigen und umweltfreundlichen Erschließung des geologischen Untergrunds durch anwendungsbezogene Forschungsarbeiten zu fördern. Mit den vorhandenen und gekoppelten wissenschaftlichen Großgeräten „Software- und Hardware-Simulator“ wird eine möglichst realitätsnahe Simulation des Tiefbohr-Prozesses, und auch geplanter konkreter Bohrprojekte, ermög-

licht mit dem Ziel, gefährliche und umweltschädigende Situationen zu vermeiden, kostenintensive Stillstandszeiten zu reduzieren, den ökologischen „foot-print“ (inklusive CO<sub>2</sub>-Bilanz) zu verbessern sowie langzeit-stabile untertägige Bauwerke zu erstellen. Die gewonnenen Forschungsergebnisse werden insbesondere auch Eingang bei der Konzeption, Planung und Realisierung zukünftiger Geothermie- und Speicherprojekte im In- und Ausland finden.

Die im Jahr 2013 begonnene Baumaßnahme zur Errichtung des Drilling Simulators Celle (DSC) konnte im Jahr 2014 mit der Fertigstellung der hierfür vorgesehenen Gebäude erfolgreich beendet werden. Aufgrund günstiger Kostenentwicklungen während der Bauphase standen im Rahmen dieses aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), des Landes



Die Teilnehmer der Strategisierung des Vereins GeoEnergy Celle im DSC.

Niedersachsen, der TU Clausthal, der Stadt Celle sowie dem Verein GeoEnergy e.V. finanzierten Vorhabens zusätzliche Mittel von rund eine Million Euro für eine Erweiterung der forschungsbezogenen betriebstechnischen Infrastruktur zur Verfügung. Dieser zweite Bauabschnitt wurde zur Jahresmitte 2015 abgeschlossen.

Seit März 2015 wird der DSC wissenschaftlich von Professor Joachim Oppelt geleitet, welcher in Personalunion die Verwaltung der Professur für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung am Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) der TU Clausthal übernommen hat. Im Zuge der Konkretisierung des wissenschaftlichen Konzepts hat das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die Ausstattung des DSC mit den geplanten wissenschaftlichen Großgeräten ein Investitionsvolumen rund 2,7 Millionen Euro genehmigt. Darüber hinaus wird sich das MWK für einen Zeitraum von fünf Jahren an den laufenden Personal- und Sachkosten der Einrichtung mit jeweils 300.000 Euro pro Jahr beteiligen.

Im Herbst 2015 konnte der Forschungsbetrieb am DSC bereits mit ersten drittmittelgeförderten Vorhaben begonnen werden. Parallel dazu wurden und werden weitere grundlagen- und anwendungsorientierte Vorhaben vorbereitet. Zum Ende des Jahres 2016 sollen die Forschungsanlagen des DSC komplett fertiggestellt und betriebsbereit sein.

Zur „Vision“ des DSC gehören neben der Unterstützung einer sicheren Energieversorgung, die auch im Einklang mit der „Energiewende“ in Deutschland steht, die Reduzierung der Kosten für Tiefbohrungen auf Erdöl, Erdgas und Geothermie sowie unterirdische Speicher und eine Verbesserung von Sicherheit und Umweltverträglichkeit des Bohrprozesses. Dies soll erreicht werden durch die Schaffung einer flexiblen und offenen Software-Hardware-Plattform zur realistischen Simulation des komplexen Bohrprozesses. Die Forschungseinrichtung wird mit Attributen ausgestattet sein, die ihr sichtbare wissenschaftlich-technische Alleinstellungsmerkmale auf globaler Ebene verleihen.

Auf dieser langfristigen Vision basieren als „Mission“ des DSC die folgenden Handlungsgrundsätze:

- Echtzeit-Simulation des komplexen Tiefbohrprozesses auf virtueller Basis unter Einbeziehung praktischer Messwerte von ausgeschnittenen Systemkomponenten (= Teilen des Bohrstranges)
- Erweiterung des mit fortschrittlichen Visualisierungseinrichtungen ausgestatteten Software-Simulators mit offenen Schnittstellen (API) zur fortlaufenden Anbindung neu entwickelter Algorithmen-Module sowie von Hardware-Versuchseinrichtungen

Wesentliches Ziel ist also die Erforschung hochinnovativer Ansätze zur Erschließung des geologischen Untergrunds und ihre Integration zu einem „Werkzeug“, das Planung und Ausführung von Tiefbohrungen unterstützt. Geplant ist die Realisierung eines „offenen“ und vernetzten Simulators, der ähnlich einem Flugsimulator auf Basis realer oder virtueller Untertageereignisse einen virtuellen Bohrprozess realitätsnah darstellt und animiert und diesen, mit Hilfe eingebetteter Regelalgorithmen, auch selbstständig steuern kann.

Geräteausstattung und Forschungsprogrammierung  
Der DSC wird im Kern aus einem Software-basierten Simulator und einem Hardware-basierten Simulator bestehen. Der Aufbau des Software-Simulators wird auf Basis eines käuflich zu erwerbenden Systems eines „Drilling Simulators“ erfolgen. Dieser bietet in der Ausgangssituation die Möglichkeit zur Simulation von Abläufen auf einer typischen Tiefbohranlage in Echtzeit. Allerdings sind Algorithmen zur Beschreibung der Vorgänge beim untertägigen Bohrprozess nur sehr rudimentär vorhanden. Eine der wichtigsten Aufgaben an dieser Stelle wird es sein, fortschrittlichere Algorithmen und entsprechende Software-Programme zu entwickeln, die die einfachen Module am Software-Simulator ersetzen und damit dessen realitätsnahe Leistungsfähigkeit signifikant verbessern.

Die zweite große Komponente am DSC wird der Hardware-Simulator sein. Hierbei handelt es sich

im Kern um ein System, das in der Lage ist, Teile des unteren Bereichs eines Bohrstrangs im Bohrloch im Labor versuchstechnisch nachzustellen. Hier kommt es darauf an, realistische Messergebnisse zu gewinnen, die in Echtzeit als Eingangsgrößen für den Software-Simulator dienen können. Dazu ist es erforderlich, den Bohrprozess, oder zumindest Teile davon, möglichst realistisch nachzubilden, indem wichtige Parameter, wie beispielsweise hydraulische Verhältnisse oder mechanische Kräfte wirksam werden. Aufgrund der in der Realität des untertägigen Bohrprozesses herrschenden großen Kräfte ist dies eine herausfordernde Aufgabe.

Hardware- und Software-Simulator werden im DSC zu einem sog. „Hardware-in-the-Loop“ (HiL) System gekoppelt.

Unter Einbeziehung der in dieser Form bislang weltweit noch nicht verfügbaren Forschungsinfrastruktur werden in den nächsten Jahren die fol-

genden Themengebiete im Fokus der Forschungsarbeiten am DSC stehen:

- Entwicklung und Test von Modellen (Algorithmen) zur Beschreibung von zunächst Teilprozessen der Bohrungsherstellung
- Entwicklung von Automatisierungs-Algorithmen für Untertagesysteme
- Entwicklung eines „Methodenbaukastens“ zur Erstellung inverser Simulationsmodelle
- Entwicklung von Human-Machine Interface (HMI) Systemen für Bohranwendungen
- Entwicklung von Verfahren zur Fernüberwachung und Fernsteuerung von Bohrprozessen
- Integration von Software- und Hardware-Simulator Komponenten zu einem nachhaltigen Gesamtsystem
- Grundlegende Untersuchungen zur Transportcharakteristik in Nicht-Newton'schen Bohrspülflüssigkeiten unter Hochdruck- und Hochtemperatur-Bedingungen
- Funktions-, Belastungs- und Zuverlässigkeitstests von Bohrsystemen



- Entwicklung und Test von echtzeitfähigen Messsystemen zur Feststellung der (relevanten) dynamischen Untertagebedingungen an Bohrsystemen
- Entwicklung tribosystemgerechter Prüfverfahren zur Analyse des abrasiven und erosiven Verschleißes in Rohren und Pumpen für die Tiefbohrtechnik
- Entwicklung leistungsfähiger Beschichtungslegierungen als Verschleißschutz in Rohren und Pumpen für die Tiefbohrtechnik
- Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen für Bohrtechnik und Bergbau
- Entwicklung und Verbesserung extrem harter Werkstoffe für Bohrmeißel
- Erstellung eines Lebensdauer-Modells für extrem harte Werkstoffe
- Untersuchung und Optimierung der Bohrlochstabilität in Tongesteinen basierend auf LWD (Logging-While-Drilling) Messungen
- Ertüchtigung von 3D-Spannungsmessungen basierend auf Wireline-Logging Verfahren
- Machbarkeitsuntersuchungen und Auslegung von Multi-Horizontalbohrloch-Behandlungen zur effizienten und umweltfreundlichen Stimulation von Geothermie-Lagerstätten

Die Forschungsarbeiten am Drilling Simulator Celle sind thematisch eng verbunden mit dem Institut für Erdöl- und Erdgasgewinnung ITE der TU Clausthal. Eine intensive Zusammenarbeit erfolgt auf der Basis komplementärer Kompetenzen. Eine gleichzeitig sorgfältig geplante Abgrenzung der jeweiligen Aktivitäten wird für eine erfolgreiche Arbeit dieser beiden Einrichtungen kennzeichnend sein. Als weitere aufgrund der Aufgabenstellung besonders partnerschaftlich verbundene Institute der TU Clausthal sind das Institut für Technische Mechanik (ITM) und das Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren (ISAF) zu nennen.

Insofern stellt die Forschungseinrichtung DSC in Niedersachsen eine gemeinsame Plattform für die Zusammenarbeit des EFZN mit dem Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (CZM) und dem Simulationswissenschaftlichen Zentrum Clausthal-Göttingen (SWZ) dar. Im angestrebten

Endergebnis unterstützen die Forschungsergebnisse des DSC energetische und energiepolitische Ziele auch des EFZN. Er bedient sich dabei insbesondere der Mittel der Simulationswissenschaft (SWZ) und auch der Materialwissenschaft (CZM). Durch die Zuordnung zum EFZN und der Zusammenarbeit mit den anderen genannten Zentren steht der DSC auch anderen niedersächsischen Universitäten (Promotionsstudenten und Habilitanden eingeschlossen), den bisherigen gebo-Verbundpartnern und weiteren Kooperationspartnern für Forschungsarbeiten zur Verfügung. Besonders hervorzuheben ist hier die aktive partnerschaftliche Mitwirkung des Instituts für Dynamik und Schwingungen (IDS) der TU Braunschweig bei der gemeinsamen Beantragung von Förderprojekten. Die wissenschaftliche Leitung des IDS wird auch aktiv in der wissenschaftlichen Leitung des DSC mitwirken und entsprechende Projekte einbringen und durchführen.

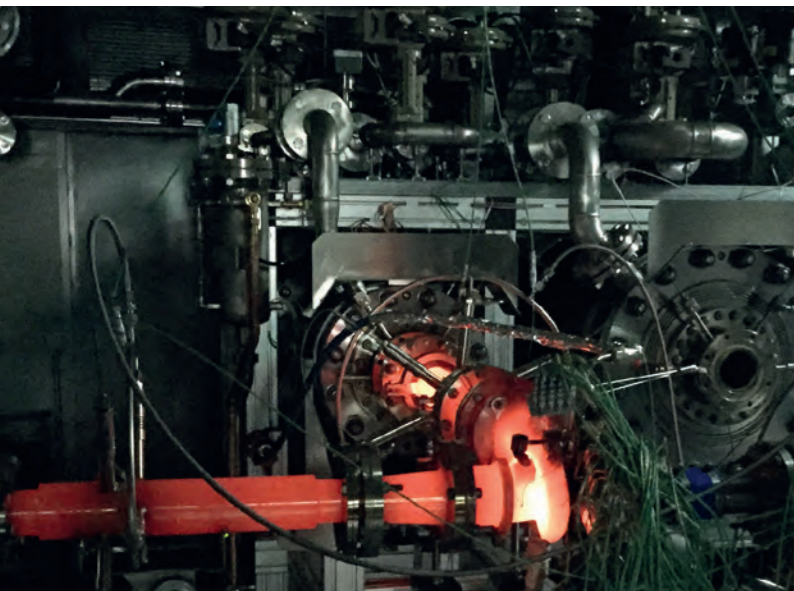
Darüber hinaus ist der DSC explizit aufgestellt für einen Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis, und damit für eine intensive Zusammenarbeit mit der Industrie und gegebenenfalls auch ausgerichtet auf entsprechende Partnerschaften, insbesondere mit den großenteils mittelständischen Unternehmen der Region Celle. Eine strategische Partnerschaft besteht bereits mit dem Verein GeoEnergy Celle e.V., in dem sich die meisten Unternehmen der einschlägigen Branche in Celle und darüber hinaus zusammengefunden haben. Außerdem sollen weitere Kontakte mit Interessensvereinigungen der Öl-, Gas- und Geothermiewirtschaft aufgenommen werden, die gegebenenfalls ebenfalls zu Partnerschaften führen können.

Schließlich wird der DSC aktiv daran arbeiten, Teil eines Netzwerkes ähnlicher wissenschaftlicher Einrichtungen auf globaler Ebene zu werden, um den Stellenwert des Zentrums in Celle zu stärken. Beispielhaft genannt seien hier die Montanuniversität Leoben (Österreich), IRIS (Norwegen), Colorado School of Mines (USA), Texas A&M University (USA), Brigham Young University (UK), University of Aberdeen/School of Engineering (UK), Heriot Watt (UK) and University of Stavanger (Norwegen).



## Versuchsstand für Aufladesysteme

Das Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) und das Institut für Kraftwerkstechnik und Wärmeübertragung (IKW) der Leibniz Universität Hannover errichteten im Rahmen des EFRE Projektes „Versuchsstand für Aufladesysteme“ am Standort des Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) einen neuen Versuchsstand. Die baulichen Maßnahmen am EFZN wurden Anfang 2015 abgeschlossen. Die Finanzierung des Projektes erfolgte mittels des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), woraus das Land Niedersachsen rund 1,8 Millionen Euro für den Bau am EFZN bereitstellte. Der restliche Etat wurde, wie bei EFRE-Projekten üblich, von der Leibniz Universität Hannover (LUH) aus Eigenmitteln sowie aus Mitteln des EFZN aufgewendet. Der errichtete Versuchsstand ermöglicht Forschungsprojekte speziell im Bereich der Aufladung von Brennstoffzellen und Downsizing-Verbrennungsmotoren sowie der Erforschung und Weiterentwicklung von elektrischen Verdichtersystemen und Organic-Rankine-Cycle (ORC) Anlagen zur Restwärmenutzung.



### Einsatzalternative Kraftstoffe

Die Entwickler von Fahrzeugantrieben sind mit den Herausforderungen der zunehmend geforderten Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit zukünftiger Antriebssysteme konfrontiert. Die Richtlinien für Klimaschutz, Abgasnormen, CO<sub>2</sub>-Grenzwerte und die Verknappung fossiler Energieträger erfordern sowohl eine kontinuierliche Absenkung des Kraftstoffverbrauches und des Schadstoffausstoßes als auch die Erforschung neuer Antriebskonzepte. Neben den innovativen und langfristigen Strategien, wie dem Einsatz alternativer Kraftstoffe, der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie sowie der Elektromobilität, verspricht die Weiterentwicklung heutiger Verbrennungsmotoren kurzfristig ein großes Potenzial, diesen neuen Herausforderungen für die gesamte Fahrzeugflotte gerecht zu werden. Auf Grund dessen sind Forschungskapazitäten auf dem Gebiet der Aufladesysteme aktuell besonders gefragt. Vor allem die hohen Abgastemperaturen von modernen, aufgeladenen Benzinmotoren erfordern hochtemperaturbeständige Versuchsstände, um anwendungsorientierte Forschungsvorhaben zu realisieren. Für die erfolgreiche Umsetzung zukünftiger Forschungsvorhaben werden in dem neuen Versuchsfeld modernste und hoch genaue Mess- und Regelungstechniken eingesetzt, wodurch zeitgleich eine hohe Flexibilität an Einsatzmöglichkeiten gewährleistet wird. Die Einsatzvielfalt des Versuchsstandes erfordert hierbei einen modularen Aufbau mit einer sehr präzise abgestimmten Infrastruktur, weshalb der Prüfstand als modularer Containerbau umgesetzt ist. Die notwendigen Konditionierungen und Abgasysteme sind in wetterfester Dachaufstellung realisiert, um eine hohe Flexibilität der Versuchsaufbauten im Inneren zu erreichen. Die Kernkomponente des neuen Prüfstands bildet die Erdgasbrenneranlage, welche als Doppelbrennkammersystem aus Edelstahl ausgeführt ist. Dieses befindet sich im Prüfraum des neuen Versuchsstandes. Die Leistung



Im Dezember 2014 wurde auf dem EnergieCampus in Goslar der Versuchsstand für Aufladesysteme der Leibniz Universität Hannover errichtet.

der kleineren Brennkammer beträgt 250 kW und die der größeren Brennkammer 800 kW.

Zur Versorgung der Brennkammern mit Erdgas dient ein Hochdruck Erdgasverdichter. Die Druckluftversorgung und die Erzeugung der Kühlleistung werden mit einem ölfreien Schraubenverdichter sowie einem Kaltwassersatz realisiert. Beide Verdichtersysteme befinden sich jeweils in einem separaten Technikcontainer, welche in unmittelbarer Nähe zu dem eigentlichen Versuchscontainer aufgestellt sind. Auf diese Weise ist es möglich, Abgastemperaturen von 150 bis 1.200 Grad Celsius und in einem Druckbereich von 1 bis 8 bar(abs) für Untersuchungen bereitzustellen. Die einstellbare Massenstromspreizung reicht dabei von 0,01 bis 0,25 kg/s für die 250 kW Brennkammer und 0,1 bis 1 kg/s für die 800 kW Brennkammer. Aufgrund der Ausführung als Doppelbrennkammersystem werden zukünftig die Entwicklung und Forschung auf dem Gebiet der Aufladung von sowohl hubraumkleinen Downsizing-Verbrennungsmotoren (PKW) als auch hubraumstarken Nutzfahrzeugmotoren (NFZ) ermöglicht. Des Weiteren sind mit dem

Doppelbrennkammersystem Untersuchungen im Bereich der Grundlagenforschung und der Weiterentwicklung von Zwillingsstromturbinen (Twin-Scroll) realisierbar.

### Organic-Rankine-Cycle (ORC)-Modul

Zusätzlich zu der beschriebenen Grundausstattung des Versuchsstandes für Aufladesysteme ist ein Organic-Rankine-Cycle (ORC)-Modul als Prüfstandweiterung erworben worden. Hierdurch ist die Möglichkeit geschaffen, die Entwicklung und Forschung auf dem Gebiet der Restwärmenutzung von Verbrennungsprozessen voranzutreiben. Mittelfristig wird sich das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand bei der Optimierung bestehender Komponenten im Verbrennungsmotor durch den hohen Standard der bereits eingesetzten Komponenten reduzieren. Dies macht den Einsatz zusätzlicher Systeme zur Wirkungsgradsteigerung attraktiv, die aus finanzieller oder technischer Sicht heute noch nicht eingesetzt werden. Ein solches System ist die Abgaswärmenutzung durch einen nachgeschalteten Dampfkreislauf. Bekannt sind diese Anlagen aus der Großkraftwerkssparte, bei denen



durch die Nachschaltung eines Dampfkreislaufs hinter eine Gasturbine Leistungs- und Gesamtwirkungsgradsteigerungen erzielt werden können. Aktuelle Bestrebungen nach geringeren Betriebskosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen etablierte Fahrzeughersteller und Zulieferer komplette Systeme sowie Teilkomponenten zur Abgaswärmenutzung für den Automobilbereich entwickeln. Aus diesem Grund ist für die automobilen Anwendungen aus technischer Sicht für die nächsten Jahre ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf der Abgaswärmenutzung mittels nachgeschalteten Dampfkreisläufen mit organischen Kreislaufmedien (ORC) vorhanden. Die zurzeit begrenzten Erfahrungen mit den Kreislaufkomponenten und Betriebsmedien erfordern die Auslegungvalidierung mittels experimenteller Untersuchungen auf ORC-Versuchsständen, die speziell für diese Anwendungen und die resultierenden Erfordernisse ausgelegt wurden. Dabei müssen diese Versuchsstände aus primär zwei Gründen hochvariabel sein. Einerseits hat sich noch kein allgemein präferiertes Kreislaufmedium hervorgetan. Andererseits muss der Versuchsstand den Austausch von allen relevanten Einzelkomponenten, wie bspw. Verdampfer, Kondensator, Pumpe und dem Einsatz von Rekuperatoren oder Expansionsmaschinen, zulassen. Zusätzlich bietet die ORC-Erweiterung des Prüfstands am EFZN auch für stationäre Anwendungen die Möglichkeiten der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Technikumsmaßstab für große Industrieanlagen voranzutreiben. So

könnte eine Effizienzsteigerung durch Abwärmennutzung mit einem ORC-Kreislauf erzielt werden.

#### **Ziel der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit neuem Versuchsstand**

Somit ist deutlich, dass das Ziel der Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit dem neuen Versuchsstand die seriennahe Weiterentwicklung der strömungsführenden Komponenten sowie die Verbesserung der Systemeigenschaften und -integration von Aufladesystemen ist. Des Weiteren sollen Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Systeme betrachtet werden. Bestehende langjährige Kooperationen des TFD mit Industriepartnern und Forschungseinrichtungen in Niedersachsen werden durch den neuen Versuchsstand verstärkt und ausgeweitet. Durch die geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten soll ein direkter Beitrag zur Absenkung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen von heutigen und zukünftigen Fahrzeugantrieben geleistet werden. Dadurch wird die zukünftige Einhaltung von Richtlinien für Klimaschutz, Abgasnormen und CO<sub>2</sub>-Grenzwerten strategisch unterstützt. Die Erkenntnisse sollen einen Beitrag zu der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit zukünftiger Antriebssysteme und Mobilitätskonzepte leisten. Nicht zuletzt wird so die Wettbewerbsfähigkeit der in Niedersachsen, Deutschland und Europa ansässigen Fahrzeug- und Zulieferindustrie unterstützt und gestärkt.

## Mitarbeiter der Geschäftsstelle 2014/2015

### Leitung



Dr. Jens-Peter Springmann  
Ressort Haushalt und Organisation



Dr. Wolfgang Dietze  
Ressort Personal, Kommunikation  
und internationale Angelegenheiten

### Verwaltung



Jessica Heinicke



Fee Strahler



Heike Stucki-Bammel

### IT-Abteilung



Christoph Gröger



Anja Stubbe



Pascal Heinichen  
(bis 03/2015)



Marco Tödteberg  
(bis 07/2014)

### Presse- und Öffentlichkeitsarbeit



Anna Heinichen



Manuel Juhrs (bis 10/2014)



Nadine Kleinander



Andreas Bierwirth

### Bibliothek

### Haustechnik



Vorstellung  
strategisch  
wichtiger Projekte  
2014/2015

3

## BESIC: Batterie-Elektrische Schwerlastfahrzeuge im Intelligenten Containerterminalbetrieb

Bei Privathaushalten verbreitet sich die Elektromobilität nur zögerlich – eine umso wichtigere Rolle spielen darum Elektrofahrzeuge in gewerblichen Anwendungen. Zunehmend werden leichte und mittelschwere Nutzfahrzeuge wie zum Beispiel bei der Stadtreinigung oder auch Linienbusse im Stadtverkehr elektrisch angetrieben. Wie das Projekt „Batterieelektrische Schwerlastfahrzeuge im Intelligenten Containerterminalbetrieb“ (BESIC) zeigt, kann die Wirtschaftlichkeitsschwelle bei Containertransportern noch eher erreicht werden. Derartige geschlossene Transportsysteme bieten nahezu optimale Bedingungen für den Einsatz von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen: Sie zeichnen sich durch regelmäßigen Fahrzeugeinsatz, geringe Nutzungskonflikte und konstante Tagesfahrleistungen aus. BESIC ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprogramms

### Projektpartner

#### Projektkoordination:

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

#### Forschungsstellen:

- Universität Oldenburg
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- Universität Göttingen

#### Partner

- HHLA Container Terminal Altenwerder GmbH
- Gottwald Post Technology GmbH
- Vattenfall Europe Innovation GmbH

„IKT für Elektromobilität II“. Als solches hat es Impulse für eine breitgefächerte Studie zur Elektromobilität im Wirtschaftsverkehr geliefert.

Am BESIC-Projekt sind der Containerterminal HHLA Container Terminal Altenwerder GmbH, der Transportfahrzeughersteller TEREX MHPS GmbH, der Energieversorger Vattenfall Europe Innovation GmbH sowie die Universitäten Oldenburg und Göttingen nebst der Technischen Universität Clausthal beteiligt. In praxisnaher Zusammenarbeit werden autonom fahrende diesel-elektrische Transportfahrzeuge mit solchen verglichen, die durch konventionelle Blei-Batteriesysteme oder durch innovative Lithium-Batteriesysteme angetrieben werden. Im Jahr 2011 wurde am Container Terminal Altenwerder (CTA), im Hamburger Hafen als erstem Terminalstandort ein Prototyp eines batterie-betriebenen fahrerlosen Transportfahrzeugs eingesetzt. Am hoch automatisierten CTA transportieren sie bis zu 70 Tonnen schwere Container zwischen Schiff und Lager – 24 Stunden am Tag, an 360 Tagen im Jahr. Gerade bei vielen kurzen Fahrzyklen, das heißt vielen Start-Stopp-Manövern, bieten Elektrofahrzeuge einen merklichen Effizienzvorteil gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Da für den alltäglichen Betrieb der Containertransporter in Relation zu ihrer Endgeschwindigkeit und der dafür erforderlichen elektrischen Leistung eine große Energiemenge benötigt wird, konzentrierte sich die Entwicklung der batterie-betriebenen Fahrzeuge auf am Markt verfügbare Blei-Batteriesysteme. Diese können derzeit von der Grundausslegung her zu deutlich niedrigeren Kosten angeschafft werden als Lithium-Batteriesysteme. Aufgrund der schnell voranschreitenden technischen Entwicklung der Lithium-Batterie-Technik und den damit einhergehend immer weiter sinkenden Preisen dieser Technologie



Forschungsprojekt BESIC am HHLA Container Terminal Altenwerder: In der Batteriewechselstation sollen die Batterien der selbstfahrenden Schwerlastfahrzeuge mit Ökostrom-Spitzen geladen werden.

werden im Projekt BESIC zwei unterschiedliche Typen von Lithium-Batteriesystemen in der Praxis auf den Prüfstand gestellt. Wesentliche Vorteile von Lithium-Batteriesystemen gegenüber Blei-Batteriesystemen liegen darin, dass diese deutlich schneller geladen werden können und das Einsatzgewicht der Lithium-Batteriesysteme wesentlich geringer ist. Im Einsatz auf dem Terminal soll das Betriebsverhalten der Lithium-Batteriesysteme unter Alltagsbedingungen getestet und ein Vergleich mit den Blei-Batteriesystemen durchgeführt werden. Hierbei werden auch Einflüsse wie Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur untersucht.

Durch logistische Simulationen konnten Auslegungsfragen rund um die Anzahl und Kapazität von Wechselbatterien sowie der Anzahl von Lade-

stellen und deren benötigter Anschlussleistungen beantwortet werden.

Führen intelligente Batteriewechsel- und Ladestrategien zu deutlichen Betriebskosteneinsparungen, kann das richtungweisend für den Schwerlastverkehr in anderen Industriebereichen sein. Bisherige Flottenversuche am CTA haben gezeigt, dass sich in Anwendung eines Batteriewechselkonzepts für das quasi-stationäre Batteriespeichervolumen ein Zweitnutzen entfalten lässt. Das Logistikgeschehen birgt bei gesteuertem Laden gewisse zeitliche Lastverschiebungspotenziale, die seitens des Terminalbetreibers im Austausch mit Stromlieferanten beziehungsweise Aggregatoren vermarktet werden können. Während ihrer Stationsaufenthalte können die Wechselbatterien in nennenswertem Umfang einem Angebot von



Auf dem HHLA Container Terminal Altenwerder sind derzeit zehn batteriebetriebene und selbstfahrende Schwerlastfahrzeuge (Automated Guided Vehicle, kurz AGV) in Betrieb, deren Batterien mit Ökostrom-Spitzen geladen werden sollen.

Regelleistung und auf Abruf der Erbringung von Regelleistung dienen. Im Unterschied zu gängigen Modellen und Verfahren der Anlageneinsatzplanung für Erzeugungs- und Speichereinheiten ist in BESIC dazu übergegangen worden, die Konditionierung der Batteriespeichersysteme als einen integralen Bestandteil der Planung der Energiebereitstellung für das sie umgebende geschlossene Transportsystem aufzugreifen.

Auf diese Weise lassen sich Ökostromspitzen vorteilhaft nutzen und die Gesamtkosten für das Laden um einen zweistelligen Prozentsatz reduzieren. Simulationsbasierte Vorhersageergebnisse tragen entscheidend dazu bei, die Elektrizitätsbe-

reitstellung für die Containertransporter planbar zu machen und das Laden an der Station auch am Tag darauf plangemäß steuern zu können. Diese durchgängige IKT-Unterstützung macht den Containerterminalbetrieb in Hamburg zu einem Vorreiter beim gesteuerten Laden im Wirtschaftsverkehr.

Die für den Containerterminalbetrieb prototypisch entwickelten Planungs- und Steuerungswerkzeuge werden im Rahmen von BESIC bereits unter Anwendung des Kommunikationsstandards OpenADR in der Produktivumgebung erprobt. Das mit neuentwickelten Werkzeugen versehene Energiemanagementsystem des Containerter-

minalbetriebs übernimmt dabei die Funktionalitäten eines sogenannten VEN (englisch Virtual End Node). Dessen übergeordnete Stelle beim externen Anlagenaggregator bildet ein Informationssystem für das Management eines virtuellen Kraftwerksbetriebs, welches im Sinne der Kommunikationsstruktur von OpenADR als sogenannter VTN (englisch Virtual Top Node) fungiert.

Das Energiemanagementsystem des Containerterminals ist trotz des regen Umlaufs der Wechselbatterien in der Lage, Abrufsignale entgegen zu nehmen und einzelne Ladeprozesse für die Erbringung von Regelleistung bewusst zu- oder abzuschalten.

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

BESIC: Batterie-Elektrische Schwerlastfahrzeuge im intelligenten Containerterminalbetrieb

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi

### Förderkennzeichen:

O1ME12095

### Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2013 bis 30.06.2016

### Berichtszeitraum:

01.01.2013 bis 31.12.2015

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath

### Projektkoordinator:

Dipl.-Inform. Serge A. Runge

E-Mail: [serge.runge@efzn.de](mailto:serge.runge@efzn.de)

Internet: [www.efzn.de](http://www.efzn.de)



Hans-Jürgen  
Appelrath



Serge A. Runge

## Forschungsverbund „Smart Nord“

Der niedersächsische Forschungsverbund „Smart Nord“ hat seine Ziele erreicht. In dem durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur mit einem Betrag von circa 4,1 Millionen Euro geförderten Forschungsverbundes, haben in den vergangenen drei Jahren (von März 2012 bis Februar 2015) etwa 40 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universitäten Oldenburg, Braunschweig, Hannover und Clausthal sowie des OFFIS-Institut für Informatik, des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen und des EWE-Forschungszentrums für Energietechnologie in sechs Teilprojekten (TP) gearbeitet.

Der Forschungsverbund „Smart Nord“ hat die koordinierte, dezentrale Bereitstellung von Wirkleistung, Regelleistung und Blindleistung in Verteilnetzen untersucht, mit dem Ziel einen stabilen Systembetrieb mit einer kleinen verbleibenden Anzahl konventioneller Großkraftwerke zu ermöglichen. Dafür ist die Entwicklung einer neuen IKT-Infrastruktur erforderlich, die alle Komponenten der Verteilnetze beinhaltet.

Die Teilprojekte von „Smart Nord“ sind durch die Transformation des europäischen und insbe-

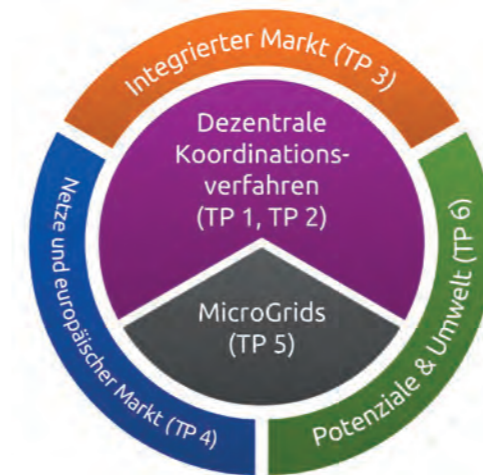
sondere des deutschen Energiesystems motiviert. Diese umfasst unter anderem die Abschaltung von Kernkraftwerken, den Ersatz von fossil befeuerten Großkraftwerken durch über Konverter einspeisende dezentrale Erzeugungseinheiten sowie die Liberalisierung des europäischen Strommarktes sowie Smart Grids und deren IKT-Infrastruktur. Die Transformation des Energiesystems zieht darüber hinaus einen Neu- und Ausbau bestehender Übertragungs- und Verteilnetze nach sich. Dieser wird benötigt um die zukünftigen Versorgungsaufgaben des Netzes gesichert leisten und die neuen Steuerungsstrategien einbinden zu können.

Im TP 1 wurden Verfahren entwickelt, mit denen die erforderliche Wirkleistung in den Verteilnetzen dezentral möglichst verbrauchsnahe durch Anlagenverbünde bereitgestellt und gleichzeitig der Verbrauch der prognostizierten Erzeugung möglichst genau angepasst werden kann. Durch die Bildung der Verbünde ist es den Anlagen auch möglich, an einem übergeordneten Strommarkt zu agieren.

In TP 2 wurden für die Anlagenverbünde Methoden für eine Bereitstellung netzstützender Systemdienstleistungen wie Regelleistung und Blindleistung in Echtzeit entwickelt und erprobt, damit diese an einem zukünftigen Markt für Regelleistung teilnehmen können.

Das Design und die Anforderungen an diese oben genannten Zukunftsmärkte wurden im Rahmen von TP 3 bearbeitet. Dazu gehörte auch die Entwicklung neuer potentieller Produkte und Vermarktungsmöglichkeiten für die Wirk- und Blindleistung der dezentralen Erzeugungsanlagen.

Basierend auf den Einsatzplänen der Anlagen, die sich aus TP 1–3 ergeben, wurde in TP 4 der resultierende Zustand der Übertragungs- und Verteilnetze in Simulationen stationärer und dy-



Übersicht der Teilprojekte im „Smart Nord“

namischer Vorgänge ausgewertet, mit dem Ziel, die Frequenzstabilität zu analysieren und Maßnahmen zu ermitteln, die die Frequenzstabilität in den zukünftigen Netzen gewährleisten.

Im TP 5 sind Regelstrategien für Verteilnetze mit einem hohen Anteil an Erzeugungsanlagen, die über Konverter angebunden sind, entwickelt worden. Dabei wurde auch die Volatilität der Einspeisung dieser Anlagen berücksichtigt. Die entwickelten Strategien bieten Vorschläge für die Regelung von Verteilnetzen, die an das überlagerte Übertragungsnetz angeschlossen sind als auch zur Regelung von Inselnetzen.

Ziel von TP 6 war es zum einen, die Potenziale für verschiedene erneuerbare Energien räumlich abzuschätzen. Zum anderen wurden Szenarien zur Entwicklung der Anlagen- und Netzstruktur simuliert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Landschaftsfunktionen und Ökosystemdienstleistungen analysiert.

Detaillierte Darstellungen der Ergebnisse finden sich im Abschlussbericht zu „Smart Nord“. Der Abschlussbericht des Forschungsverbundes „Smart Nord“ kann auf der Website des Projekts heruntergeladen werden oder in Papierform bei Dr.-Ing. Torsten Rendel bestellt werden (solange der Vorrat reicht).

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Forschungsverbund Smart Nord

**Fördernde Stelle:**  
Ministerium für Wissenschaft und Kultur

**Förderkennzeichen:**  
VWZN2764

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.03.2012 bis 28.02.2015 (Phase 1 & 2)

**Berichtszeitraum:**  
31.12.2013 bis 28.02.2015

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann

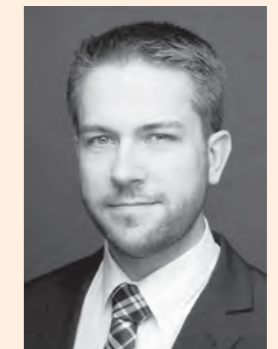
**Projektkoordinator:**  
Dr.-Ing. Torsten Rendel

**E-Mail:** rendel@ifes.uni-hannover.de,  
hofmann@ifes.uni-hannover.de

**Internet:** www.smartnord.de



Lutz Hofmann



Torsten Rendel

# Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (gebo)

Ziel der Energiewende in Deutschland ist die Transformation des Energiesystems hin zu einem nachhaltigen, umweltschonenden Energiesystem unter Wahrung der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit. Der konsequente Ausbau der erneuerbaren Energien, die Reduktion von Treibhausgas-Emissionen sowie ein grundsätzlich effizienteres Energiesystem sind dabei zentrale Kernpunkte zum Erreichen der gesetzten Ziele. Für die Transformation der heutigen Energieversorgungsstrukturen von fossilen Energieträgern hin zu regenerativen Energien könnte die tiefen-geothermischen Energie – unter Berücksichtigung des Zieldreiecks „Klima- und Umweltschutz“, „Versorgungssicherheit“ sowie „Wirtschaftlichkeit/Bezahlbarkeit“ – einen wesentlichen Anteil leisten.

Ihre wesentlichen Vorteile sind die Verfügbarkeit unabhängig von Tageszeiten, saisonalen Schwankungen und Witterungsbedingungen und damit ihr Substitutionspotenzial im Grundlastbereich sowie die Perspektiven für eine Energieversorgung unabhängig von fossilen Rohstoffen. Die Nutzung der tiefen Erdwärme (Geothermie) kann zukünftig einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und einer künftig sicheren Energieversorgung leisten. Die Landesregierung Niedersachsen verfolgt das Ziel, das im niedersächsischen Untergrund vorhandene geothermische Potenzial künftig umfassend für Wärme- und Stromversorgung zu erschließen. Trotz der eher moderaten Untergrundtemperaturen liegen in Niedersachsen gute Voraussetzungen vor, dieses Ziel zu erreichen: Niedersachsen verfügt über ein beachtliches geothermisches Potenzial, die Kenntnisse über den geologischen Untergrund sind aufgrund der hier tätigen Erdöl- und Erdgasindustrie gut und die wissenschaftliche und industrielle Infrastruktur für die Erkundung und Entwicklung des geologischen Untergrundes ist hervorragend.

Für die Stromerzeugung aus geothermischer Energie sind die petrothermale und einige hydrothermale Systeme von Bedeutung. Hydrothermale Systeme nutzen die Energie des im Untergrund vorhandenen Wassers und petrothermale Systeme nutzen die Energie, die im Gestein des Untergrundes gespeichert ist. Petrothermale Systeme werden auch als Hot-Dry-Rock (HDR) beziehungsweise Enhanced Geothermal System (EGS) bezeichnet. Die Erschließung tiefen-geothermischer Energie durch petrothermale Systeme ist bisher allerdings mit hohen Kosten und Risiken verbunden. Sie resultieren insbesondere aus der aufwändigen Herstellung der notwendigen Tiefbohrungen und der Erschließung der erforderlichen geologischen Wärmetauscher. Für alle Nutzungsmöglichkeiten werden Tiefbohrungen benötigt – Ausnahme vulkanisch beeinflusste Gebieten. (Abbildung 1)

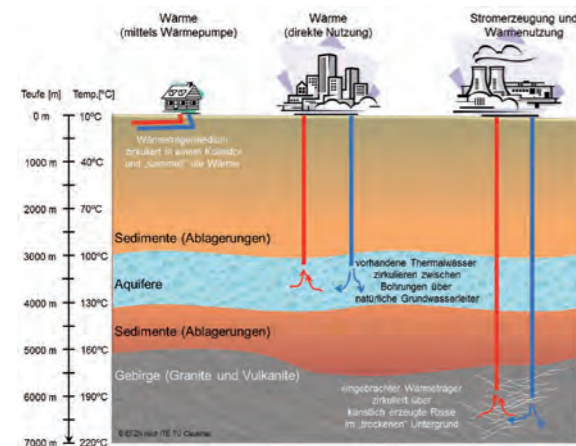


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Nutzung der Geothermie in Norddeutschland.

derlichen geologischen Wärmetauscher. Für alle Nutzungsmöglichkeiten werden Tiefbohrungen benötigt – Ausnahme vulkanisch beeinflusste Gebieten. (Abbildung 1)

Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen forschen gemeinsam im Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (gebo) an diesen Herausforderungen. Im Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (gebo) arbeiten Ingenieure, Geologen und Physiker daran, die in der Erdkruste steckende Energie zu nutzen. Schließlich ist diese immer verfügbar und hängt im Gegensatz zu den Erneuerbaren Wind- und Sonnenenergie weder vom Wetter noch von Tages- oder Jahreszeiten ab. Der Verbund wurde von der VolkswagenStiftung mit mehreren Millionen Euro unterstützt. Auch wenn diese Förderung 2014 ausgelaufen ist, verfolgen die Wissenschaftler das Zukunftsthema Geothermie intensiv weiter.

Denn um Erdwärme möglichst überall nutzen zu können, müssen nicht nur buchstäblich viele Steine aus dem Weg geräumt werden. In Niedersachsen etwa muss 6.000 Meter tief gebohrt werden, um an Schichten zu gelangen, in denen die für ein geothermisches Kraftwerk gewünschten 200 bis 250 Grad Celsius erreicht werden. Die größte Hürde dabei sind die hohen Kosten. Jede Bohrung verschlingt Millionen Euro, und jedes Geothermie-Kraftwerk braucht zwei der tiefen Löcher. Durch eines wird kaltes Wasser hineingepumpt und aus dem anderen heißer Dampf entnommen, der dann eine Kraftwerksturbinen antreiben und so Strom erzeugen kann.

Die aktuelle Technologie zur Herstellung von Tiefbohrungen ist angepasst an die Erfordernisse der Erdöl- und Erdgasindustrie. Erdöl- und Erdgasbohrungen werden hergestellt, um für die Dauer der Ausbeute eine zuverlässige Verbindung zwischen einer Lagerstätte im Untergrund und der Übertageinstallation zu schaffen. Dies gilt grundsätzlich auch für Geothermiebohrungen, insbesondere für hydrothermale Bohrungen mit Endteufen von 3.000 bis 4.000 Metern. Deutlich andere Voraus-

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Niedersächsischer Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (gebo)

**Fördernde Stelle:**  
Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur  
Baker Hughes INTEQ GmbH

**Förderkennzeichen:**  
ZN2481, ZN2525, ZN2649, ZN2741

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.02.2009 bis 31.01.2014

**Berichtszeitraum:**  
01.02.2009 bis 31.01.2014

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer

**Projektkoordinator:**  
Dipl.-Ing. Frank Mattioli

**E-Mail:** frank.mattioli@efzn.de

**Internet:** www.gebo-nds.de



Georg-Peter Ostermeyer



Frank Mattioli

setzungen im Vergleich zu Erdöl- und Erdgasbohrungen sind jedoch gegeben für die Bohrungen petrothermaler Systeme, mit denen die im „trockenen, harten“ Gestein gespeicherte thermische Energie gewonnen werden soll:

- die durchschnittliche Temperatur ist größer,
- das Endziel ist Hartgestein, zum Beispiel Vulkanit,
- für den Betrieb des Systems sind großflächige und nachhaltige, natürlich vorhandene oder künstlich zu schaffende Wärmetauscher Voraussetzung,
- zur Begrenzung des hydraulischen Widerstands bei Produktion oder Injektion werden größere Fließquerschnitte gebraucht,
- die durchschnittliche Teufe ist größer.

Für diese ungünstigeren Bedingungen müssen neue Antworten gefunden werden. (Abbildung 2)

Hier setzt der Forschungsverbund gebo mit dem Ziel an, neue Konzepte zur geothermischen Ener-

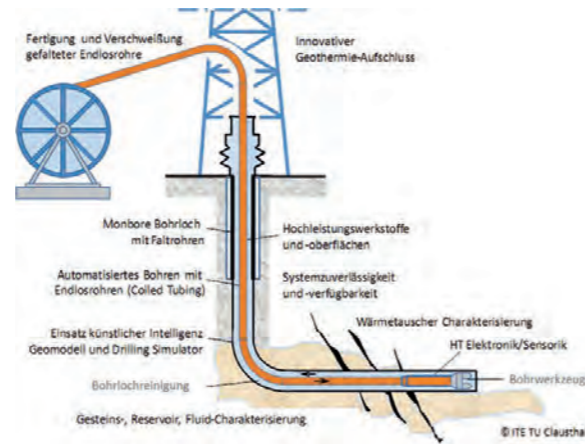


Abbildung 2: Das angestrebte Bohrkonzep innerhalb des Forschungsverbundes gebo mit den dazugehörigen Themengebieten, die in den jeweiligen Forschungsschwerpunkten abgearbeitet werden.

giegewinnung in tiefen geologischen Schichten mit hoher Effizienz und Effektivität sowie geringerem geologischen und technischen Risiko zu entwickeln, um die bislang noch fehlende Wirtschaftlichkeit dieser regenerativen Energiequelle herzustellen. Mit der Fokussierung seiner Anstrengungen auf innovative Aspekte bei der Herstellung von Bohrungen und der Entwicklung untertägiger Wärmetauscher adressiert der Verbund genau die Bereiche eines Geothermieprojektes, in denen die Kosten (etwa 70 Prozent Anteil an den Gesamtinvestitionen) und die Risiken am größten sind.

Geologen, Physiker und Ingenieure der gebo Forschungspartner untersuchen nun, welche Regionen sich besonders gut für Geothermie eignen. Und sie entwickeln neue Messverfahren, die zuverlässige Vorhersagen zu Kosten und Sicherheit einer Bohrung ermöglichen. Außerdem prüfen die Forscher Alternativen zum heute üblicherweise eingesetzten mechanischem Bohrmeißel, der während des Prozesses mehrfach teuer und aufwändig getauscht werden muss. Ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung sind die eingesetzten Materialien. Weder Erschüt-

terungen, noch Temperaturen bis zu 250 Grad Celsius und Drücke bis zu 1.000 bar, noch salzhaltiges Grundwasser dürfen ihnen etwas anhaben. Das gilt auch für die Messtechnik, mit der zum Beispiel unter Tage navigiert und andere wichtigen Daten ermittelt werden können.

Das übergeordnete Ziel des Forschungsverbundes gebo ist es, wesentliche, wissenschaftlich hochwertige Beiträge zu einer zukünftigen, sicheren Bohrungsherstellung unter niedersächsentypischen „Hot-Hard-Rock“ Bedingungen und deren Ausbau zu Geothermiebohrungen mit nachhaltigen geologischen Wärmetauschern zu leisten. Die Arbeiten des Verbundes sollen dazu beitragen:

- die Bohrkosten zu senken,
- die Bohrtechnologie für den Einsatz in hartem und heißem Gestein sicherer zu machen,
- das Fündigkeitsrisiko zu reduzieren.

Das Ziel soll erreicht werden durch Erforschung hochinnovativer Technologieansätze als Module eines Gesamtkonzepts für neuartige Verfahren zur Herstellung tiefer Geothermiebohrungen in harten Gesteinsschichten, und in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Ingenieuren und Wissenschaftlern und in Kooperation von Industrie und Wissenschaft. (Abbildung 3)

Im Einzelnen sollen

- Technologien für eine angemessene Erfassung und Charakterisierung des geologischen Untergrundes entwickelt werden,
- hohe Bohrungsergiebigkeiten durch nachhaltige geologische Wärmetauscher sichergestellt werden,
- Ansätze und Konzepte zur Senkung der für Geothermie-Kraftwerke dominierenden Herstellungskosten von Tiefbohrung aufgezeigt und erforscht werden,
- kritische Beiträge für die Ermöglichung eines sicheren Einsatzes moderner Bohrtechnik auf Temperaturen > 200 Grad Celsius geleistet werden,
- der Aufschluss von Hartgestein durch neue Materialien und Werkzeuge verbessert werden,

- technische Risiken aufgrund von hohen Temperaturen und Förderraten, wechselnden Beanspruchungen, Salzbeladung, et cetera beherrschbar gemacht werden.

Der Forschungsverbund gebo vereint die traditionellen Stärken der beteiligten niedersächsischen Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen in den Geowissenschaften, der Bohrtechnik, den Werkstoffwissenschaften und den Technischen Systemen. Über 40 Wissenschaftler und Ingenieure arbeiten im Verbund interdisziplinär zusammen, um neue Konzepte, Werkstoffe und Bauteile zu entwickeln und zu bewerten. (Abbildung 4)

Im Forschungsverbund gebo arbeiten Wissenschaftler und Mitarbeiter verschiedener niedersächsischer Einrichtungen und Universitäten vier Schwerpunkte zusammen: Geosystem, Bohrtechnik, Techniksystem und Werkstoffe. Zur stärkeren Verknüpfung der vier Schwerpunkte ist ein Lenkungsausschuss eingerichtet, dem die Schwerpunktkoordinatoren, der Sprecher des Verbundes und die Vertreter der Industriepartner angehören.

## Projektpartner

### Projektkoordination:

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

### Forschungsstellen:

- TU Braunschweig
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- TU Clausthal
- Universität Göttingen
- Universität Hannover
- Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

### Berater

- Baker Hughes INTEQ GmbH



Abbildung 3: Der Forschungsverbund gebo mit seinen vier Schwerpunkten Geosystem, Bohrtechnik, Werkstoffe, Techniksystem eingebettet in die globale Entwicklungsaktivitäten der Firma Baker Hughes.



ren. Als beratende Stütze steht dem Lenkungsausschuss der Beirat zur Seite, insbesondere bei Fragen zur Einhaltung wissenschaftlicher, wirtschaftlicher und energiepolitischer Zielsetzungen. Daneben ist zur Unterstützung des Sprechers und des Lenkungsausschusses eine Geschäftsstelle am EFZN eingerichtet.

Im September 2011 wurde der Forschungsverbund im Auftrag des MWK durch die WKN begutachtet. Im Bericht heißt es: Die Gutachtergruppe stuft gebo aus regionaler, nationaler und internationaler Sicht als innovatives Vorreiterprojekt ein, das wesentliche Beiträge dazu leisten kann, den Ausbau der (grundlastfähigen) Tiefen Geothermie in der Fläche und mit großen Kraftwerken als wichtigen Baustein in einem künftigen Mix der Erneuerbaren Energien voranzutreiben. Die

Einrichtung von gebo (vor der durch die Bundesregierung 2011 eingeleiteten Energiewende) sei mutig, visionär und im Rückblick genau zur richtigen Zeit erfolgt. Nirgendwo in Kontinentaleuropa seien die Voraussetzungen für die Bearbeitung eines derartigen Verbundprojekts so gut wie in Niedersachsen, da hier eine ideale Konstellation von universitären und außeruniversitären Einrichtungen sowie von weltweit agierenden Industrieunternehmen anzutreffen sei.

Die Gutachter kamen zu der Auffassung, dass die in gebo adressierten Themen unbedingt über das Projektende in 2014 hinaus fortgeführt werden sollten. Sie ermutigten das Land Niedersachsen und die Industrie von Gutachterseite ausdrücklich, sich über das Ende von gebo hinaus weiterhin und nachhaltig in der Geothermie- und



Abbildung 4: Die gebo-Community: Über 40 Wissenschaftler und Ingenieure arbeiten im Forschungsverbund interdisziplinär zusammen, um neue Konzepte, Werkstoffe und Bauteile zu entwickeln und zu bewerten, unterstützt vom und durch den Industriepartner Baker Hughes.

Bohrtechnikforschung zu engagieren. So finden die Ergebnisse aus dem Forschungsverbund gebo unter anderem mit dem Drilling Simulator Celle (siehe Darstellung in diesem Bericht) seine Verstärkung.

Ende 2015 wurde das Forschungsvorhaben gebo erfolgreich beendet. Alle 32 Projekte aus den vier Schwerpunkten Geosystem, Bohrtechnik, Techniksystem und Werkstoffe haben Ihre wissenschaftlichen Erkenntnisse in entsprechenden Abschlussberichten dokumentiert. Aufgrund der nationalen wie internationalen Bedeutung und Beachtung der Ergebnisse aus dem Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik gibt es innerhalb der EFZN-Schriftenreihe eine englisch sprachige Publikation „Final Report of Geothermal Energy and High-Performance Drilling Collaborative Research Program“ (Band 30; ISBN 978-3-7369-9080-7) in vier Teilen.

Weitere Herausforderungen zur Nutzung der tiefen-geothermischen Energie müssen gemeistert werden. Dazu bedarf es „begreifbare“, realisierte tiefen-geothermische Projekte! An Ideen mangelt es den Wissenschaftlern dabei nicht. Konkrete Vorschläge sind in einer „Strategiegruppe post-gebo“ unter Beteiligung von Politik und Industrie in einem Review Board zwischen 2012/2013 erarbeitet worden.

Parallel zu den gebo-Aktivitäten wurde ab 2013 der Drilling Simulator Celle aufgebaut und im Frühjahr 2015 in Betrieb genommen. Zur Verstärkung der Forschungsarbeiten von gebo entstand die Idee, einen hybriden Drilling Simulator zu entwickeln (siehe Abbildung 5).

Dieses Layout ist in besonderer Weise dazu geeignet, neue innovative Bohrtechniken und Gesteinszerstörungsmechanismen zur Erschließung petrothermaler Geothermiehorizonte unter Berücksichtigung der Dynamik gesamter Bohrstränge zu entwickeln und zu testen. Für die Umsetzung dieser Idee im Drilling Simulator Celle befindet sich ein umfassendes FuE-Projekt in der Antragsphase.

Dieses hybride Konzept kombiniert die Vorteile eines virtuellen Modells mit denen eines Hardware-Teststandes. So werden einerseits die „Schwächen“ der mathematischen Modellierung durch die Integration physikalischer Modelle, zum Beispiel komplette Bohrgarnituren, im Teststand umgangen. Andererseits bietet die mathematische Modellierung die Möglichkeit, den teilweise kilometerlangen Bohrstrang oberhalb der Schnittstelle zu berücksichtigen.

Unabhängig von allen technischen Herausforderungen müssen nicht zuletzt auch Akzeptanzprobleme gelöst werden, denn spätestens seit den Diskussionen um das Erdgas-Fracking sorgen sich viele Menschen um die Umweltfolgen solcher Bohrprojekte. Die Forscher wollen die Menschen nun überzeugen, dass Geothermie nicht nur ungefährlich und ökologisch unbedenklich ist, sondern zudem eine Technologie, mit der Deutschland einmal mehr eine Vorreiterrolle auf dem Weg zur sauberen Energieversorgung spielen kann.

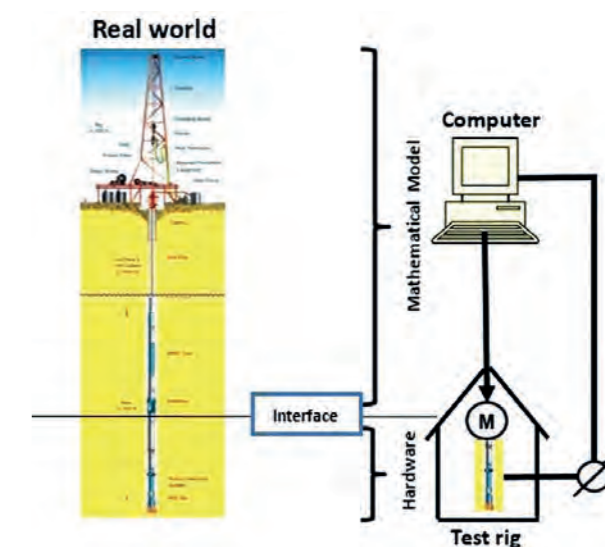


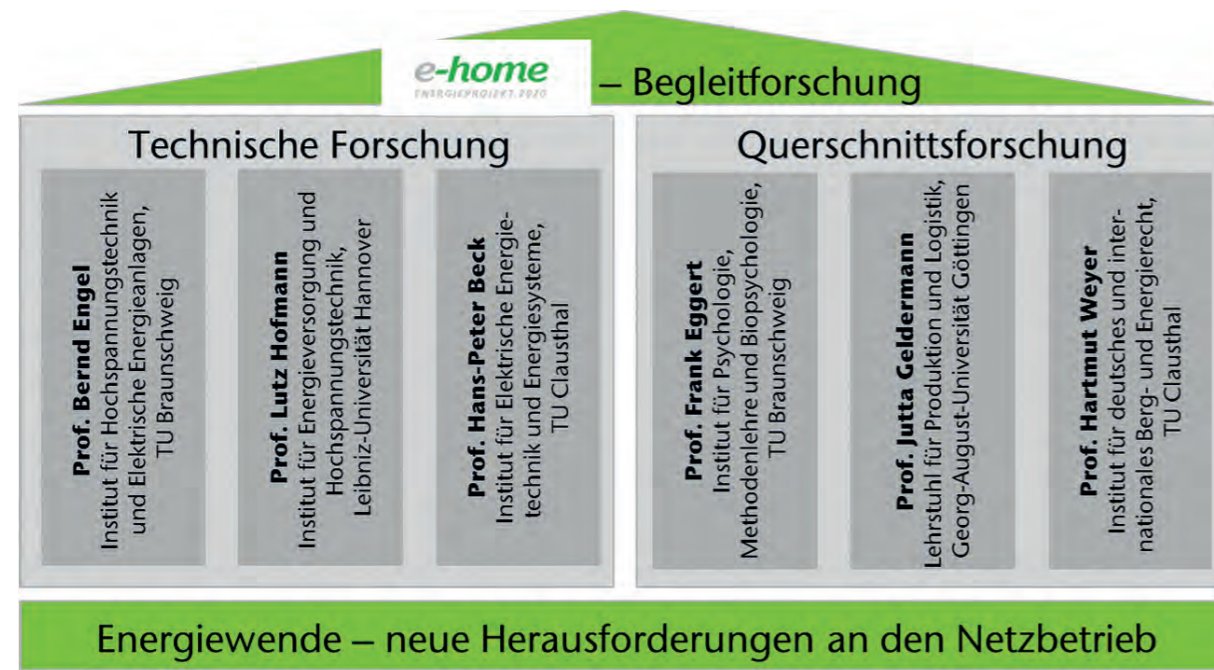
Abbildung 5: Prinzipielles Layout eines HIL Drilling Simulators (SPE/IADC-173045-MS)

## e-home Energieprojekt 2020

Im Forschungsvorhaben e-home Energieprojekt 2020 werden vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) und Avacon gemeinsam die vielfältigen Folgen neuer Komponenten im Niederspannungsnetz analysiert. Die Forschungen werden durch konkrete Verbrauchsdaten aus teilnehmenden Haushalten und netztechnischen Zulieferungen von Avacon unterstützt. Dadurch sind die Arbeiten in diesem Projekt sehr praxisnah. Das Verbundprojekt startete im Jahr 2010 und war zunächst für eine Laufzeit von zwei Jahren geplant (Phase 1). Im August 2013 einigte sich das EFZN und Avacon auf eine Verlängerung um weitere drei Jahre (Phase 2), somit startete im Sommer 2015 das fünfte Projektjahr. Durch die flexible Ge-

staltung der Arbeitspakete ließ sich diese Veränderung problemlos in den Projektablauf integrieren. Parallel dazu übergab Professor Lutz Hofmann (Universität Hannover) die wissenschaftliche Projektleitung an Professor Jutta Geldermann (Universität Göttingen). Die Projektkoordination blieb in den Händen des EFZN, jedoch fand auch hier ein personeller Wechsel statt.

Im Zuge der Verlängerung wurde der Fokus der Forschungsarbeiten verschoben. Während in der ersten Phase primär netzplanerische und -technische Fragestellungen untersucht worden sind, verschob sich dies in der zweiten Phase in Richtung Querschnittsforschung (siehe Abbildung 1).



Darstellung: A. Becker

Abbildung 1: Zusammensetzung des e-home Konsortiums

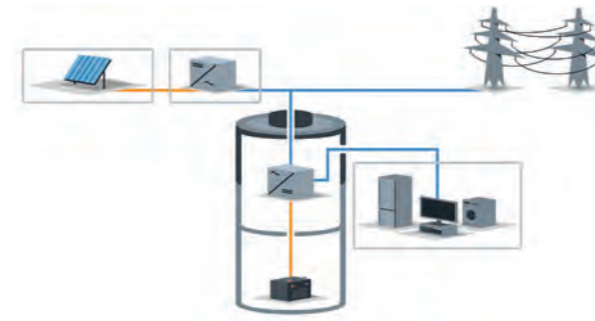


Abbildung 2: Beispielhaftes Installationsschema eines Batteriespeichers in Reihe (Quelle: H.Loges)

Zusätzlich zur Photovoltaik und den Smart Metern wurde den aus dem Raum Bremen teilnehmenden Haushalten ein Batteriespeicher angeboten. Als weitere neuartige Netzkomponente wurden Elektroautos ins Projekt implementiert. Für die Querschnittsforschung ergaben sich durch diese Konstellation neue Fragestellungen. Beim Batteriespeicher standen die Wirtschaftlichkeit, die Akzeptanz durch die Kunden und die ökologische Bewertung im verstärkten Fokus.

### Technische Forschung

Mit Hilfe von Speichern ist es möglich, die fluktuierende Erzeugung aus Wind- und Solaranlagen zu verstetigen und so besser an die Verbraucherbedürfnisse anzupassen. Während Batterien bisher nur in Randbereichen der Energieversorgung eingesetzt worden sind (zum Beispiel zur Erzeugung von Notstrom in Krankenhäusern), machten technische Fortschritte die Speichern auch für private Haushalte nutzbar. In Kombination mit einer Photovoltaikanlagen lässt sich so die Eigenverbrauchsquote erhöhen. Die Quote beschreibt den Anteil von solarerzeugtem Strom, der vor Ort genutzt wird und nicht in das öffentliche Netz eingespeist wird.

Die technische Einbindung eines Speichers in ein Hausnetz mit einer Photovoltaikanlage ist auf verschiedene Weisen möglich, die von Professor

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
e-home Energieprojekt 2020

**Fördernde Stelle:**  
Avacon AG

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.05.2013 bis 30.06.2016 (Phase 2)

**Berichtszeitraum:**  
01.05.2013 bis 31.12.2015

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr. Jutta Geldermann

**Projektkoordinator:**  
Jan Ahmels, M.A.

**E-Mail:** jan.ahmels@efzn.de

**Internet:** www.ehomeprojekt.de



Jutta Geldermann



Jan Ahmels

Bernd Engel (TU Braunschweig) näher untersucht worden sind. Eine beispielhafte Installation ist in Abbildung 2 dargestellt. Um die Inselfähigkeit des Systems zu gewährleisten ist der Speicher in Reihe zum Netz geschaltet. Dadurch lässt sich bei diesem Einbau nur ein Gesamtwirkungsgrad von 61 Prozent messen, da der gesamte Strom durch den Wechselrichter geleitet wird.

Erhöht werden kann der Wirkungsgrad bei einer AC-Verschaltung durch Installation per Stichleitung. Auf diese Weise lässt sich der Gesamtwirkungsgrad auf bis zu 72 Prozent erhöhen. Bis zu 94 Prozent sind hingegen möglich, wenn der Speicher per DC-Verschaltung angeschlossen wird (siehe Abbildung 3).

Die Steigerung ist maßgeblich durch die reduzierten Umwandlungsverluste begründet. In allen untersuchten Fällen ließ sich die Eigenverbrauchsquote durch die Installation des Speichers erhöhen, im Einzelnen waren hier Quoten von bis zu 70 Prozent pro Haushalt möglich.

Neben den Verlusten „hinten dem Zähler“ ging es in der technischen Forschung auch um die Verluste, die im öffentlichen Netz entstehen und wie diese reduziert werden können. Dazu fanden im Berichtszeitraum verschiedene Untersuchungen und Modellierungen statt. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf den Betriebsverlusten, die durch regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT) verursacht werden. Diese Untersuchungen wurden von Prof. Hans-Peter Beck (TU Clausthal) geleitet. Durch alternative Regelungskonzepte (zum Beispiel Monosensorbetrieb mit variabler Sollwertvorgabe in Abhängigkeit der gemessenen Solarstrahlung), kann im Vergleich zum Multisensorbetrieb mit wenig

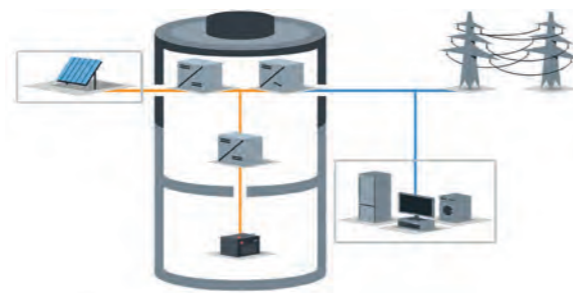


Abbildung 3: DC seitiges Installationsschema eines Batteriespeichers (Quelle: H.Loges)

### Van-Westendorp-Diagramm (invertierte Version)

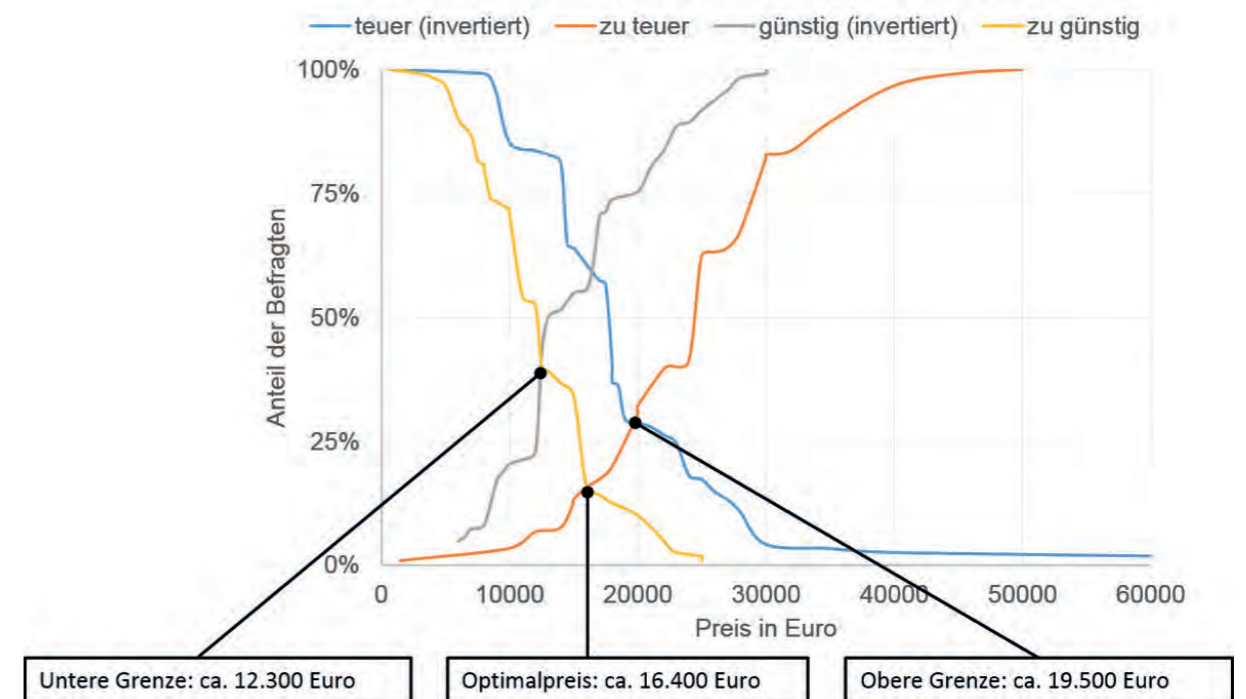


Abbildung 4: Ermittlung des Minimal-, Maximal- und Optimalpreises für ein Elektroauto (Quelle: M.Horn)

Zusatzaufwand das bestehende Netz hinsichtlich der Spannungstoleranzen besser ausgenutzt werden kann. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, die Spannung in lastgeprägten Zeiten an der Ortsnetzstation hochzusetzen, um somit bei überwiegend nichtlinearen Lasten die Netzverluste zu reduzieren. Am Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) der Leibniz-Universität Hannover wurden parallel dazu weitere Optionen analysiert, bei denen durch die simulative Darstellung von Niederspannungsnetzen ebenfalls Maßnahmen zur Reduktion der Netzverluste aufgezeigt werden. Beide Institute werden die Untersuchungen bis zum Projektende fortsetzen, um einen Vergleich der Verluste zu ermöglichen, um zukünftig durch den Einsatz von rONT und einer geeigneten Regelung die Verluste im Niederspannungsnetz zu reduzieren.

### Querschnittsforschung

Parallel zu den technischen Parametern werden in der Querschnittsforschung des e-home Projektes verschiedene nicht-technische Aspekte betrachtet. Dieser Teil der Forschung ist in der zweiten Projektphase in den Vordergrund gerückt. Gemeinsam mit Avacon wird hier der Blick auf den Kunden geworfen und geschaut, welche Bedürfnisse, Motivationen und Möglichkeiten er hat, sich an der Energiewende zu beteiligen. Ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Wirtschaftlichkeit der Anlagen, die im Folgenden vom Lehrstuhl von Professor Geldermann näher untersucht wird. Darüber hinaus gibt es auch weitere, teils psychologische Gründe, warum Kunden sich einen Batteriespeicher oder ein Elektroauto kaufen. Diesen Fragen

### Projektpartner

#### Projektkoordination

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)

#### Beteiligte Institute

- Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig, Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
- Institut für Elektrische Energietechnik, TU Clausthal, Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck
- Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung, Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann
- Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Professur für Produktion und Logistik, Georg-August-Universität Göttingen, Prof. Dr. Jutta Geldermann
- Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht, TU Clausthal, Prof. Dr. Hartmut Weyer
- Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische, Methodenlehre und Biopsychologie, TU Braunschweig, Prof. Dr. habil. Frank Eggert.

#### Externe Partner

- Avacon AG (ehemals E.ON Avacon AG)

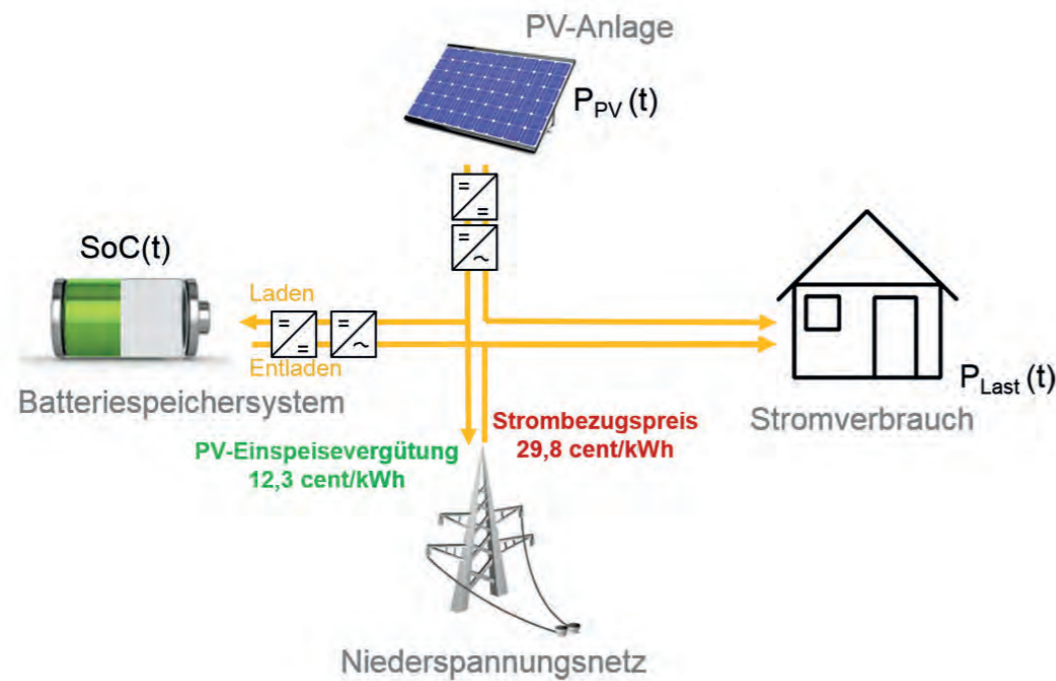


Abbildung 5: Darstellung der Lastflüsse in einem Haushalt mit PV-Anlagen und Batteriespeicher (Quelle: T. Lühn)

widmet sich der Lehrstuhl von Professor Eggert an der TU Braunschweig. Abschließend werden die rechtlichen Besonderheiten von Professor Hartmut Weyer (TU Clausthal) genauer erläutert.

Als Hauptbarrieren für die Verbreitung von Elektroautos sind aus Kundensicht der hohe Anschaffungspreis und die geringe Reichweite zu nennen. Durch Umfragen konnte ein Optimalpreis für ein elektrisches Fahrzeug ermittelt werden (siehe dazu Abbildung 4). Während die ersten Hinweise auf diesen Preis bereits durch Umfragen unter den e-home Teilnehmer vorlagen, wurde eine zweite Vergleichsbefragung durchgeführt, um auch die Zahlungsbereitschaften von weniger involvierten Personen zu erfragen.

Die Ergebnisse der Vergleichsbefragung lagen nur marginal unter denen der e-home Teilnehmer, das heißt auch unbeteiligte Personen (sofern sie als

Zustimmer zur Technologie kategorisiert werden können) besitzen eine ähnlich hohe Zahlungsbereitschaft. Auch hinsichtlich der Bedeutungsgewichte der Eigenschaften eines Elektro-PKWs lassen sich Gemeinsamkeiten finden. So ist in beiden Gruppen eine gleiche Rangfolge bei den Bedeutungsgewichten der Fahrzeugeigenschaften festzustellen. Die Teilnehmer der Vergleichsstichprobe weisen insbesondere den Unterhaltungskosten ein höheres Bedeutungsgewicht zu. Bei Betrachtung der Bedeutungsgewichte in Anhängigkeit der gebildeten Untergruppen fällt folgendes auf: Die Zustimmer legen im Vergleich zu den Ablehner ein geringeres Gewicht auf die (vermeintlichen) Nachteile der Elektro-Autos, Lade- beziehungsweise Tankdauer sowie Reichweite. Am stärksten ist der Unterschied bzgl. des Bedeutungsgewichts der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Diese Fahrzeugeigenschaft ist für die Zustimmer deutlich wichtiger als für die Ablehner.

Während im Bereich Mobilität die Kosten zwischen fossilem und elektrischem Antrieb noch weit auseinander liegen, lässt sich beim Strom ein anderes Bild aufzeigen. Mit dem stetigen Absinken der PV-Einspeisetarife trat im Jahr 2012 die Netzparität ein. Ab diesem Zeitpunkt war es für Verbraucher günstiger, wenn sie Strom vom eigenen Dach nutzen, anstatt die Energie aus dem Netz zu beziehen. Mit dem weiteren Absinken der EEG-Tarife wurde es für die Haushalte zunehmend attraktiver, den Solarstrom zu verwenden. Durch die zwingende Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch und die Verfügbarkeit der Sonne unterliegt die bereits genannte Eigenverbrauchsquote jedoch verschiedenen Restriktionen. Durch einen Energiespeicher kann eine Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch erfolgen, in Folge dieser sich der Solarstrom auch nach Sonnenuntergang nutzen lässt.

In der mathematischen Analyse wurde die Wirtschaftlichkeit von Eigenverbrauchssystemen mit

und ohne Batteriespeicher betrachtet. Hierfür wurden unterschiedliche Lastflüsse, Verbräuche und Speicherkapazitäten berücksichtigt. Als zentrale Parameter wurden die Anschaffungspreise der Batteriesysteme, die Höhe der PV-Einspeisetarife und der Anstieg des konventionellen Stromtarifs identifiziert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bereits heute Eigenverbrauchssysteme mit kleinen Batteriespeichern wirtschaftlich zu betreiben sind. Die zu erzielenden Renditen werden in den nächsten Jahren aufgrund sinkender Anschaffungspreise für die Speicher steigen. Dennoch werden voraussichtlich weiterhin Eigenverbrauchssysteme ohne Speicher höhere Renditen als Eigenverbrauchssysteme mit Speicher erzielen können. Für die Zukunft besteht weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Berücksichtigung von Elektroautos und elektrischen Wärmepumpe als zusätzliche Verbraucher im Haushalt.

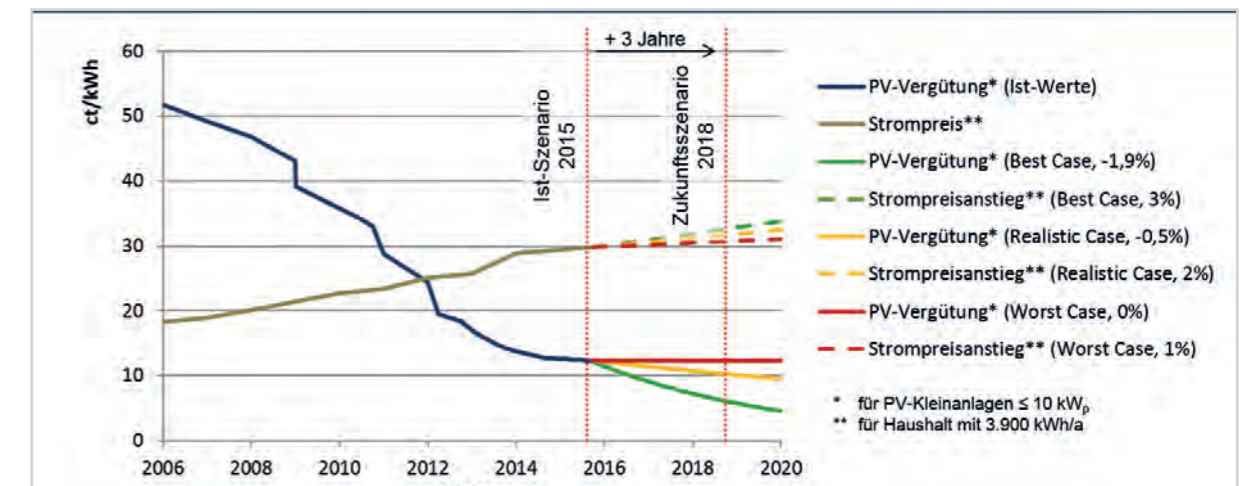


Abbildung 6: Prognose über weitere Kostenläufe (Quelle: T. Lühn)

## NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen

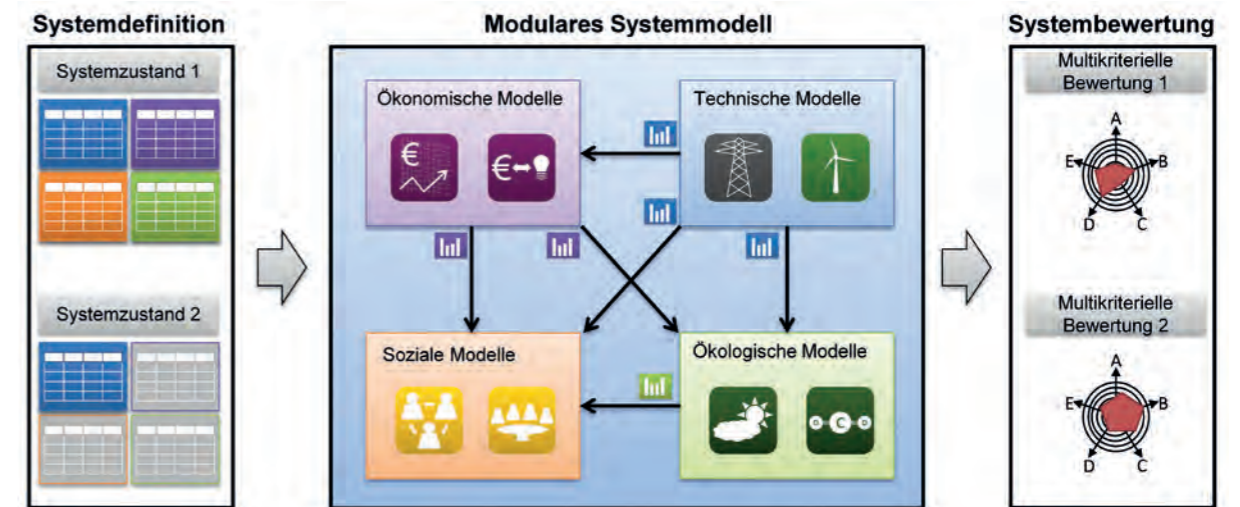
Ziel von NEDS ist die Entwicklung und Überprüfung von Szenarien einer zukünftigen nachhaltigen Energieversorgung für Niedersachsen sowie die Bestimmung von optimalen technologischen Umsetzungspfaden zur Erreichung dieser Zielvorgabe unter Nachhaltigkeitskriterien. Unter einer nachhaltigen Energieversorgung verstehen wir eine solche, die vor dem Hintergrund der im Projekt identifizierten Nachhaltigkeitskriterien sowohl den Bedürfnissen der heutigen Bevölkerung als auch jenen zukünftiger Generationen bis über das Jahr 2050 hinaus bestmöglich gerecht wird. Dies bezieht auch den Zustand der niedersächsischen Natur, die Nutzung der natürlichen Ressourcen durch den Einsatz erneuerbarer Energien sowie sozioökonomische Auswirkungen und gesellschaftliche Akzeptanz mit ein. Neben den dazu erforderlichen technischen Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel dezentrale Energieeinspeisungen aus erneuerbaren Energien, angepasste Netzstrukturen und Systemführungen, sind auch Aspekte der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit beim Aus- und Umbau entsprechender Energieversorgungsstrukturen und institutioneller Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Der Aus- und Umbau der Energieversorgungsstrukturen ist aufgrund der bereits begonnenen tiefgreifenden Transformation des Elektroenergiesystems erforderlich, die ihrerseits durch eine immer stärkere Nutzung erneuerbarer Energien und eine ressourcenschonende Nutzung unserer Umwelt angestoßen wurde und wird und bei der Niedersachsen eine entscheidende Vorreiterrolle (zum Beispiel Ausbau der Windenergie, Netzausbau) einnimmt. Die Transformation des gesamten Elektroenergiesystems bringt neben den genannten technischen Herausforderungen auch eine starke Veränderung der ökonomischen Beziehungen zwischen den Marktteilnehmern, aber auch der lange gewachsenen sozialen Rahmenbedingungen und Beziehungen in unserer

Gesellschaft mit sich. Für die Erreichung des Ziels einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgungsstrukturen mit allen ihren Aspekten ist ein Gleichklang der von den Menschen und der Gesellschaft gestellten Anforderungen sowie der Anforderungen, die aus Technik, Ökonomie und Ökologie resultieren, anzustreben. Dieses inter- und transdisziplinäre Projekt soll dazu einen wichtigen Beitrag liefern und eine verzahnte Gesamtbewertung von möglichen Energieversorgungsstrukturen und ihrer Umsetzungspfade vom Ist-Zustand in die angestrebte Struktur im Spannungsfeld aus Technik, Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft/Sozialverträglichkeit auf Basis einer multikriteriellen Bewertung vornehmen.

Die zu betrachtenden Zukunftsszenarien einer nachhaltigen Energieversorgung für Niedersachsen wie auch ihre technologischen Umsetzungspfade werden sich sowohl in der erforderlichen Systemtechnik als auch in den Ausprägungen der Bewertungskriterien deutlich unterscheiden. Die Bewertungen der Szenarien sollen im inter- und transdisziplinären Austausch und im Rahmen von Symposien mit relevanten gesellschaftlichen Gruppen erarbeitet und definiert werden. Besonderes Augenmerk wird auf die dynamische Entwicklung von Technologiekomponenten gelegt.

### Arbeitsplan

Auf operativer Ebene untergliedert sich das Verbundvorhaben in die Teilprojekte TP 1 bis TP 8. Der interdisziplinäre Ansatz dieses Projektes verlangt es, dass die einzelnen Partner stark untereinander vernetzt sind. So müssen unter anderem für eine volkswirtschaftliche Bewertung des zukünftigen Strompreises die Marktpreisentwicklungen anhand von Marktsimulationen untersucht werden. Dies wiederum bedingt eine Simulation des Erzeugungsparks inklusive des Übertragungsnetzes sowie die Modellierung der zukünftigen



Für die Erreichung des Ziels einer nachhaltigen Entwicklung der Energieversorgungsstrukturen mit allen ihren Aspekten ist ein Gleichklang der von den Menschen und der Gesellschaft gestellten Anforderungen sowie der Anforderungen, die aus Technik, Ökonomie und Ökologie resultieren, anzustreben.

Lastsituation. Da sich die Entwicklung der zukünftigen Last jedoch nicht ausschließlich auf technische Aspekte zurückführen lässt, ist auch hier eine Kopplung mit sozialwissenschaftlichen Untersuchungen hinsichtlich des Verbraucherverhaltens notwendig.

### Teilprojekt 1 – Bewertungsdimensionen und Verhaltensadaption im Rahmen der Entwicklung eines nachhaltigen Energiesystems

Ein nachhaltiges Energiesystem besteht aus unterschiedlichen technologischen Komponenten, die Entwicklung eines solchen Systems, die sich in den skizzierten Pfaden repräsentieren lässt, geht mit unterschiedlichen Kombinationen solcher technologischen Komponenten einher. Mit einem Teil dieser Komponenten sind die Menschen, deren Versorgung mit Energie ein Teilziel des Systems darstellt direkt oder indirekt konfrontiert (vergleiche TP 3), andere sind ihrer unmittelbaren Erfahrung zumindest teilweise entzogen (vergleiche TP 6). Neben einer abstrahierten Betrachtung eines Energieversorgungssystems als solchem und den an es herangetragenen Anforderungen, sind vor allem die

konkreten Veränderungen, die mit Veränderungen der technologischen Komponenten oder ihrer Zusammensetzung verbunden sind und die Konsequenzen für das individuelle oder soziale Verhalten des Menschen nach sich ziehen, ein wesentlicher Faktor in der Entstehung individueller Bewertungen. Dabei können unterschiedliche Bewertungsdimensionen relevant sein und je nach Kontext ihr Gewicht verändern.

Im Kontext des Gesamtprojektes soll hier das Zusammenspiel technologischer, ökonomischer und ökologischer Veränderungen durch Veränderungen des Energiesystems im Hinblick auf die individuelle Repräsentation der damit verbundenen Konsequenzen und die davon abhängigen Bewertungsprozesse theoretisch analysiert werden. Die für die entsprechende Modellierung notwendigen Parameter sollen dann durch geeignete empirische Zugangswege zumindest exemplarisch geschätzt werden.

Ein nachhaltiges Energiesystem besteht nicht nur aus unterschiedlichen technologischen Komponenten, vielmehr gehören zu ihm auch die Konsumenten, die mit ihrem Verhalten wesentliche

Charakteristika des Versorgungssystems mitdefinieren. Veränderungen im Versorgungssystem erfordern gegebenenfalls Anpassungen im Verhalten beziehungsweise geändertes Verhalten kann ein wesentlicher Baustein der Entwicklung eines veränderten Versorgungssystems sein. Welche Rolle das individuelle Verhalten im Rahmen der hier betrachteten Veränderungen als Komponente oder gegebenenfalls auch als Hemmnis spielen kann, soll im Rahmen dieses Teilprojektes untersucht werden. Dabei richtet sich das Interesse neben der Analyse der Interdependenzen zwischen technologischen Attributen des Versorgungssystems und dem sich daran adaptierenden Verhalten auch auf interventionsorientierte Fragen, also inwiefern und auf welchem Wege die relevanten Verhaltenskomponenten der Verbraucher beeinflusst werden können, diese Betrachtung soll vor allem hinsichtlich der in TP 3 untersuchten Settings thematisiert werden.

Im Kontext des Gesamtprojektes und vor allem in enger Abstimmung mit den in TP 3 geplanten Untersuchungen soll hier das Zusammenspiel technologischer und behavioraler Veränderungen durch Veränderungen des Energiesystems theoretisch analysiert werden. Die für die jeweiligen Einzelfragestellungen abgeleiteten theoretischen Vorhersagen sollen dann durch geeignete empirische Zugangswege zumindest exemplarisch geprüft werden.

#### Teilprojekt 2 – Transformation von Energiesystemen als soziale Diffusion

Die Akzeptanz und Übernahme („Adoption“) einer Innovation durch sog. „Adopter“ hängt sowohl von deren Motiv- und Interessenlagen als auch den Charakteristika beziehungsweise dem Zustand des relevanten Diffusionssystems ab. Letzteres umfasst vier Dimensionen:

- Charakteristika der Innovation unter dem Aspekt relativer Vorteile für die potenziellen Adopter (ökonomische Vorteilhaftigkeit, kulturelle Anschlussfähigkeit, Erprobbarkeit, Beobachtbarkeit, Re-Inventions-Fähigkeit).
- Soziale Struktur innerhalb des Diffusionssystems: Schlüsselakteure (Change Agents, Opinion Leaders), Merkmale der potenziellen

Adopter, Netzwerke, formale und informale Institutionen, Kommunikationsroutinen

- Zeitliche Struktur und Entwicklungsstadium des bisherigen Diffusionsprozesses: (a) Ablauf der individuellen Entscheidungssequenz (Adoptionsprozess), (b) Unterschiedliche Grade an Adoptionsneigung, gemessen in Zeit, (c) Kumulierte Darstellung der Anzahl erfolgreicher Adoptionen im Zeitablauf.
- Kommunikationskanäle: Neben technischen (Massen-)Medien erweisen sich unmittelbare Formen des interpersonalen Austausches als bedeutsam; sowohl Kommunikations- als auch Kulturtheorien sind geeignete Zugänge, um den interaktiven Kontext sozialer Diffusion zu analysieren und zu gestalten.

Ein zentrales Merkmal diffusionsorientierter Zugänge besteht in der Prämisse, dass die Entscheidungen potenzieller Adopter nicht nur von strukturellen Merkmalen, sondern insbesondere von der Anzahl bereits erfolgreicher Übernahmen abhängen, die von den Entscheidungsträgern beobachtet werden (vergleiche [22]). Diese soziale Interdependenz des Adopterverhaltens bildet die Basis für Vernetzungs- und Kommunikationsstrategien, die eine Diffusionsdynamik (soziale „Kettenreaktion“) auslösen oder begünstigen können. Um diese Logik auf den Forschungsgegenstand des Projektes NEDS zu übertragen, kommen neben der Diffusionsforschung auch Konzepte der Netzwerk-, Institutionen-, Kommunikations- und Konsumforschung zum Einsatz

Im Kontext des Gesamtprojektes knüpft dieses Teilprojekt an TP 5 und TP 8 an, aus denen sich die relevanten Objekte der notwendigen Diffusion ableiten lassen, nämlich erstens das Design der technologischen Elemente der Transformation (Anlagen zur Energieproduktion, Verteilnetze, Informationssysteme, Effizienzinnovationen) und zweitens notwendige Handlungsmuster (Energienachfrage, Nutzung von Informationssystemen seitens der Energieverbraucher, Integration in Smart Grid- oder andere dezentrale Energiesysteme, Prosumentenaktivitäten, Investitionen in eigene Anlagen zur Energieerzeugung). Die hierauf fußende Darstellung des Diffusionssystems

dient dazu, die verschiedenen Transformations-szenarien aus sich der sozialen Beziehungen und Dynamiken darstellen zu können, um Management- und Handlungskonzepte für die Gestaltung solcher Rahmenbedingungen abzuleiten, die nicht Technikbereich liegen.

#### Teilprojekt 3 – Smart Home im Smart Grid

In Hinblick auf ein zukünftiges Smart Grid und eine damit einhergehende, nachhaltige Energieversorgung in Niedersachsen, erfolgt in diesem Teilprojekt die technoökonomische Betrachtung auf der Ebene der Hausanschlüsse, im Folgenden als Smart Home bezeichnet. Aus netztechnischer Sicht werden unter anderem Regularien bezüglich des Netzanschlusses und Anlagenspezifika hinsichtlich netzkonformen Verhaltens in Verbindung mit dem Niederspannungsnetz berücksichtigt. Zudem werden vereinzelt Netzsimulationen des Niederspannungsnetzes durchgeführt. Im Kontext des Gesamtprojektes bildet dieses Teilprojekt den Akteur „Endverbraucher“ in einem Energieversorgungssystem ab. Das Wissen beziehungsweise das detaillierte Abschätzen einer zukünftigen Struktur der Haushalte und eine Entwicklung hin zu einem individuellen Smart Home sind von essenzieller Bedeutung für die Ausgestaltung einer nachhaltigen Energieversorgung und der Gestaltung von Entwicklungspfaden.

Konkret sind in diesem Teilprojekt folgende Frage-/Aufgabenstellungen zu bearbeiten:

- Wie wird zukünftig das Smart Home definiert und welche technischen Entwicklungen sind auf Ebene der Hausanschlüsse zu erwarten? Hierzu wird das TP 1 zusammen mit dem TP 2 Entwicklungen bezüglich der technologischen Durchdringungsgrade erarbeiten.
- Auf Basis der technologischen Entwicklungen werden in Zusammenarbeit mit dem TP 1 technische Potenziale und Schnittstellen, die eine Verhaltensadaptation erfordern beziehungsweise einer solchen dienen können.
- Es erfolgt eine Modellierung von zukünftigen Hausanschlussprofilen auf Basis herkömmlicher und neuer Technologien unter der Annahme nachhaltiger Verhaltensbeeinflussung sowie einer Einflussnahme eines Anlagenver-

## Daten zum Projekt

#### Vorhabenbezeichnung:

NEDS – Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen

#### Fördernde Stelle:

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur

#### Förderkennzeichen:

ZN3043

#### Laufzeit des Vorhabens:

01.04.2015 bis 31.03.2019

#### Berichtszeitraum:

01.04.2015 bis 31.12.2015

#### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann

#### Projektkoordinator:

Dr.-Ing. Torsten Rendel

E-Mail: [rendel@ifes.uni-hannover.de](mailto:rendel@ifes.uni-hannover.de)

Internet: [www.neds-niedersachsen.de](http://www.neds-niedersachsen.de)



Lutz Hofmann



Torsten Rendel

bundes auf Betriebsweisen der Eigenerzeugungsanlagen. Hierzu erfolgt eine teilprojektübergreifende Zusammenarbeit mit dem TP 1 und dem TP 4.

- Zur Klärung der Frage, inwiefern die Lastsituation aus einem nachhaltigen Smart Home Betrieb einem nachhaltigen Betrieb des Verteil- und Übertragungsnetzes zulässt, erfolgt eine Verknüpfung mit dem TP 6, sowie eigene Berechnungen im NS-Netz.
- Zur Beantwortung der Frage einer nachhaltigen Entwicklung und Integration von Smart Home in die zukünftige Energieversorgung, werden ökologische und ökonomische Kennzahlen auf Hausanschlussebene erhoben. Diese fließen in die multikriterielle Bewertung von TP 8, sowie als Grundlage für volkswirtschaftliche Bewertungen in TP 7 ein.

#### Teilprojekt 4 – Szenarienbasierte Analyse und Optimierung von nachhaltigen Smart Grids

In Ergänzung der Betrachtungen auf Ebene des Gesamtsystems (TP 6) und der individuellen Smart Homes (TP 3) erfordert eine systematische Entwicklung und Analyse von nachhaltigen Betriebsstrategien für Smart Grids auf Ebene der Verteilnetze (Nieder- und Mittelspannung) die Berücksichtigung wenigstens der folgenden Effekte:

- (lokale) Nutzung von erneuerbaren Energien: Ermöglicht ein Smart Grid eine unmittelbar bessere (lokale) Nutzung von erneuerbaren Energien?

#### Projektpartner

##### Projektkoordination

- Leibniz Universität Hannover

##### Forschungsstellen:

- Technische Universität Braunschweig,
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- OFFIS – Institut für Informatik
- Leibniz Universität Hannover
- Georg-August-Universität Göttingen

- Netzstabilität: Wie wirken sich Smart-Grid-Konzepte gesamtsystemisch im Zusammenspiel mit den konventionellen Kraftwerkskapazitäten aus?
- Emissionen und Ressourcenverbrauch: Welcher Einsatz der konventionellen Kraftwerkskapazitäten resultiert unter Berücksichtigung von Smart Grids?
- kurz- und mittelfristige Entwicklung der Strompreise: Wie entwickeln sich unter Einfluss der Smart Grids kurz- und mittelfristig die Strompreise? Welchen sozialen Impact hat dies?
- langfristige Entwicklung des (konventionellen) Kraftwerksparks: Wie entwickelt sich der (konventionelle) Kraftwerkspark in Abhängigkeit der Entwicklung der Strompreise sowie der resultierenden Kraftwerkseinsatzzeiten?

Im Zentrum der Betrachtungen dieses Teilprojekts stehen dabei intelligente, multikriteriell optimierende Betriebsstrategien für Smart Grids, die mit Hilfe einer simulationsbasierten Analyse von Smart-Grid-Szenarien bewertet werden sollen. Ein solches Smart-Grid-Szenario umfasst mindestens eine Beschreibung der angenommenen elektrotechnischen Infrastruktur (elektrische Netze und Betriebsmittel, Durchdringung mit dezentralen Energiesystemen, ...), eine Beschreibung der angenommenen informationstechnischen Infrastruktur (Verfügbarkeit und Verbreitung von Kommunikationstechnologien und -standards, Betriebsführungskonzepte, ...) sowie eine Dokumentation der wirtschaftlichen, sozialen und umweltpolitischen Rahmenbedingungen. Ausgehend von den gemeinsam im Projekt definierten Bewertungskriterien werden Indikatoren und Metriken entwickelt, die als Input für Modelle anderer Teilprojekte dienen oder zur ganzheitlichen Bewertung hinsichtlich der aufgezeigten Effekte herangezogen werden können.

Die Bewertung stützt sich dabei insbesondere auf Ergebnisdaten aus den Simulationsrechnungen, die im Rahmen des TP 5 auf Grundlage der hier definierten Szenarien und den in diesem TP entwickelten Betriebsstrategien durchgeführt werden. Bei der Entwicklung der Betriebsstrategien sind zudem die Strategien der Smart Homes aus

TP 3 zu berücksichtigen, da sie einen signifikanten Einfluss auf die verfügbaren Steuerungsfreiheitsgrade dezentraler Anlagen ausüben können. Darüber hinaus bestehen Schnittstellen zum TP 6, da die Bewertung der Smart-Grid-Konzepte hinsichtlich der Effekte auf Netzstabilität, Emissionen, Strompreise und Kraftwerksparkentwicklung nur im Gesamtsystem der Energieversorgung sinnvoll zu bewerten sind. Für die multikriterielle Bewertung im Rahmen des TP 8 werden zudem auch Investitions- und Betriebskosten der informationstechnischen Infrastruktur aufbereitet.

#### Teilprojekt 5 – Simulationsplattform zur Nachhaltigkeitsbewertung von Smart Grid Szenarien

Die am OFFIS entwickelte Simulationsplattform mosaik zur Integration von Modellen der Komponenten eines Smart Grids erlaubt die simulative Bewertung von komplexen Szenarien für Smart Grids. Insbesondere ist hierbei zu gewährleisten, dass die im Projekt identifizierten relevanten Systemparameter sowie Schnittstellen zu anderen Teilprojekten integriert sind und berücksichtigt werden. Zur Analyse und Bewertung der – in den zu erwartenden umfangreichen Simulationen – anfallenden Daten, ist eine Komponente zur automatischen Extraktion von Indikatoren zur Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten erforderlich. Eine solche Software-Komponente muss zunächst Indikatorwerte, wie etwa CO<sub>2</sub>-Emissionen, Nutzerstrategien, aggregierte Kosten oder Verletzungen von technischen Nebenbedingungen aus den Simulationsdaten der gegebenen Szenarien (teil-) automatisiert herleiten können und sodann diese Indikatorwerte einem werkzeugbasierten, multikriteriellen Vergleich der Szenarien zugänglich machen. Eine wichtige Aufgabe besteht hierbei auch darin, die Modelle, Szenarien und ihre Bewertungen in kompakter Form so persistent zu speichern, dass sie einem partizipativen Prozess zugänglich gemacht werden können.

Konkret sind in diesem Teilprojekt folgende Forschungsfragen zu beantworten:

1. Wie können die anfallenden Datenmengen der komplexen Simulationen effizient und robust persistiert werden?

2. Wie können diese Informationen so ausgewertet werden, dass die zur Projektlaufzeit identifizierten Nachhaltigkeitsindikatoren ausgewertet werden können?
3. Wie ist die Performanz der umfangreichen Simulationen mit feingranularer Auflösung zu optimieren, sodass optimale Simulationszeiten erreicht werden?
4. Welche Modelle sind für derart umfangreiche Simulationsszenarien zu berücksichtigen und zu komponieren?

Betrachtet man die Architektur des Gesamtprojektes, besitzt dieses TP vor allem Verbindungen zu TP 1 und TP 4. Insbesondere werden von TP 4 die optimierten Betriebsstrategien für die Smart Grid-Simulationen sowie die Metriken und Kennzahlen für die Datenauswertung benötigt. Im Gegenzug werden an TP 4 detaillierte Anlagenmodelle geliefert. Die Beziehung zu TP 1 ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Abschätzung über den Flächenbedarf für PV- und Windanlagen im Nieder- und Mittelspannungsnetz geliefert wird.

#### Teilprojekt 6 – Nachhaltige Netzausbauplanung für eine regenerative Stromversorgung

Dieses TP ist auf die technischen und ökonomischen Systemaspekte und deren Wechselwirkungen mit den soziologischen und ökologischen Systemaspekten fokussiert. Die Zielstellung ist dabei zum einen die Entwicklung von Modellen und Methoden für eine automatisierte optimierte Netzausbauplanung in den verschiedenen Spannungsebenen und zum anderen die Entwicklung und Berechnung von Kenngrößen, die eine Bewertung der technischen und ökonomischen Aspekte und deren Wechselwirkungen in Hinblick auf die Nachhaltigkeitsaspekte im Rahmen der multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung in TP 8 ermöglichen.

Die zu entwickelnden Modelle und Methoden sollen im ersten Schritt die technischen und ökonomischen Aspekte bei einer zunehmenden Integration von dezentralen und auf erneuerbaren Energien basierenden Erzeugungsanlagen in die Stromnetze beschreiben und analysieren.

In einem zweiten Schritt wird dieses Modell mit einem Strommarktmodell gekoppelt, das den europäischen Großhandelsmarkt analysiert und die Strompreise und den Kraftwerkeinsatz, der sich aus den Angeboten und Nachfrage (TP 3) im ganzen europäischen Netzgebiet der ENTSO-E und den angrenzenden Netzgebieten ergibt. Dieses Modell ist dann so zu erweitern, dass auf Basis von vorgegebenen spannungsebenenspezifischen Planungsgrundsätzen eine weitgehend automatisierte spannungsebenenübergreifende optimierte Netzausplanung durchgeführt werden kann. Auf Basis der Ergebnisse dieses Modells können dann Zusammenarbeit mit TP 4 und TP 5 die technischen Systemaspekte und alternative Betriebsführungskonzepte analysiert werden.

Weitere technische Untersuchungsschwerpunkte sind nach der Festlegung des Netzausbaubedarfs die Stabilität des resultierenden Gesamtsystems, die Spannungshaltung und Bereitstellung von Systemdienstleistungen und die Netzverluste, sowie das Fehlgeschehen, die Bereitstellung von Kurzschlussleistung und die Kurzschlussfestigkeit. Diese Aspekte werden mit Hilfe von Zeitreihensimulationen (zum Beispiel Jahresscheiben in stündlicher Auflösung) untersucht.

Auf Basis der Systemauslegung und der Analyse der technischen und ökonomischen Aspekte und ihrer Wechselwirkungen können in einem zweiten Schritt die Wechselwirkungen der Technik und Ökonomie mit den sozialen (TP 1 und TP 2) und ökologischen Systemaspekten analysiert und geeignet durch Kennzahlen beschrieben werden. Bei der Beschreibung und Bewertung dieser Wechselwirkungen sind eine intensive Zusammenarbeit mit den Teilprojekten (TP 7 und TP 8), die Definition von Schnittstellen und Übergabegrößen und eine gemeinsame Erarbeitung von sinnvollen Kenngrößen erforderlich.

#### **Teilprojekt 7 – Gesamtwirtschaftliche Nachhaltigkeitsbewertung**

In diesem Teilprojekt wird die Nachhaltigkeit der langfristigen Entwicklungspfade von Technologien zur Elektrizitätserzeugung in Niedersachsen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht untersucht.

Dabei steht der Ausbau der EE bis zum Jahr 2050 im Fokus der Analyse. Zu diesem Zweck wird ein dynamisches allgemeines Gleichgewichtsmodell neu entwickelt und auf volkswirtschaftliche Daten für Niedersachsen kalibriert. Das Modell beinhaltet einen Arbeits-, einen Kapital- und einen Ressourcenmarkt sowie externe Effekte (Umwelt und ggf. Soziales sowie Wissens-Spillovers), so dass eine langfristige, intertemporale Optimierung unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten möglich ist. Mit Hilfe dieses Modells können Wohlfahrts- und Verteilungseffekte (Auswirkungen auf Elektrizitätserzeuger und andere Produzenten sowie auf Konsumenten) der untersuchten Politiken ermittelt werden. Es wird außerdem der optimale Einsatz von Politikinstrumenten (Steuern und Subventionen) ermittelt, um die optimale nachhaltige Strategie wirtschaftspolitisch umzusetzen. Die Ergebnisse dieser volkswirtschaftlichen Analyse tragen sowohl zur Findung des geeigneten nachhaltigen Entwicklungsziels des Energiesystemausbaus in 2050 als auch zu den Inputgrößen der multikriteriellen Nachhaltigkeitsbewertung bei.

Im Rahmen des Informationsaustauschs zwischen den am Projekt beteiligten Modellen werden Informationen zu (marginalen) Kosten der Stromgestehung mithilfe verschiedener Technologien und maximaler Kapazitäten als Modelinput (eventuell auch zu Strompreisen) und zu dem Anteil von EE verwendet. Außerdem werden quantitative Informationen über externe Effekte (Umwelt, Soziales), die sich aus den weiteren Teilprojekten ergeben, in das Modell implementiert. Als Output für die anderen Modelle des Projekts und die multikriterielle Analyse werden optimale ökonomische Wachstumspfade (Timing) und Ziele für 2050 bereitgestellt, die bspw. Informationen über die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt, den optimalen Ausbau von EE, deren Kosten und die Kostenverteilung beinhalten. Diese Pfade beinhalten auch die optimale Wahl von Politikinstrumenten, das heißt von Steuern und Subventionen, um die Energiestrategie ökonomisch umzusetzen. Dies berücksichtigt die ökonomischen Auswirkungen auf verschiedene ökonomische Agenten wie Konsumenten, Stromerzeuger und andere Produzenten. Sie beinhalten ebenfalls Informationen

über die optimale Ressourcennutzung, Umweltauswirkungen und soziale Aspekte (Arbeitsmarkt, Belastungen für verschiedene Produzenten und Konsumenten). Das Teilprojekt adressiert folgende Forschungsfragen:

1. Welches Timing und welches Ziel (zum Beispiel Anteil von EE) ergeben sich für die Transition des niedersächsischen Energiesystems aus der Wohlfahrtsmaximierung?
2. In welchem Ausmaß sind negative externe Effekte (Umwelt und Soziales) ökonomisch effizient?
3. Welche gesamtwirtschaftlichen Kosten und Verteilungswirkungen ergeben sich aus der Transition?
4. Mit welchen Politikinstrumenten kann die nachhaltige Transition des niedersächsischen Energiesystems umgesetzt werden?
5. Welche Rolle spielen Lernkurveneffekte und technischer Fortschritt?
6. Welche Rolle spielen Pfadabhängigkeiten und Lock-in-Effekte durch bestehende Kapazitäten traditioneller Energietechnologien und eine verspätete Transition?

#### **Teilprojekt 8 – Multikriterielle Bewertung von Transitions Pfaden**

Das Teilprojekt wendet Methoden zur Mehrzielentscheidungsunterstützung an und entwickelt sie für die vorliegende Fragestellung weiter. Zur Strom- und Wärmeversorgung steht eine Vielzahl technischer Alternativen zur Verfügung. Bei der Auswahl von Energietechniken sind Aspekte der Wirtschaftlichkeit, Versorgungssicherheit, Akzeptanz und Umweltauswirkungen zu berücksichtigen. Dafür bieten sich Multi-Attribut-Methoden zum Vergleich der Energietechniken an, da diese eine Bewertung a priori bekannter, diskreter Alternativen auf Basis einer simultanen Betrachtung mehrerer Kriterien ermöglichen, die in unterschiedlichen Einheiten ausgedrückt werden. Als Alternativen gelten verschiedene Kombinationen von Energietechniken, die durch Umwandlung von Primär- oder Sekundärenergieträgern die Bereitstellung von Strom und Nutzwärme ermöglichen.

Etablierte Methoden wie PROMETHEE (oder auch andere Multi-Attribut-Verfahren) basieren auf

der Festlegung von Kriterien (vergleiche andere Teilprojekte) und deren Ausprägungen. Des Weiteren müssen die Kriteriengewichtungen quantifiziert werden, welche die subjektiven Wertvorstellungen hinsichtlich der relativen Bedeutung der Kriterien widerspiegeln, etwa im Hinblick auf das Ziel der nachhaltigen Energieversorgung für Niedersachsen. Allerdings ist in den letzten Jahren eine dynamische Veränderung des Energiesektors zu beobachten. Auch in Zukunft ist zu erwarten, dass die Bedeutung der Bewertungskriterien nicht zwangsläufig für alle Alternativen gleich ist. Denn zu einem späteren Zeitpunkt kann möglicherweise das Leistungsniveau der älteren Technologie, die gegebenenfalls keine erheblichen Entwicklungspotenziale aufweist, übertroffen werden. Bei der multikriteriellen Bewertung von Transitions Pfaden sind die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Technologiediffusion sowie Pfadabhängigkeiten zu berücksichtigen. Dafür liegen bislang noch keine geeigneten Methoden vor.

Um die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Technologien abzugrenzen und somit eine an den Entwicklungsstand angepasste Gewichtung zu ermöglichen, kann auf das Konzept des Lebenszyklus beziehungsweise Marktzyklus eines Produktes zurückgegriffen werden.

Konkret sind in diesem Teilprojekt folgende Frage-/Aufgabenstellungen zu bearbeiten:

- Erstellung einer Kriterienhierarchie zur Abbildung bewertungsrelevanter Aspekte der Wirtschaftlichkeit (TP 7), Versorgungssicherheit (TP 6), Akzeptanz (TP 1)
- Ermittlung von Alternativen, das heißt Technologiekombinationen zur nachhaltigen Strom- und Wärmeversorgung in Niedersachsen
- Untersuchung von Pfadabhängigkeiten für die Zielerreichung einer nachhaltigen Energieversorgung für Niedersachsen im Jahr 2050
- Erweiterung der Methoden der Mehrzielentscheidungsunterstützung (beziehungsweise des MADM-Verfahrens PROMETHEE) zur Beurteilung von dynamischen Transitions Pfaden
- Sensitivitätsanalyse und Identifikation von Korrekturmaßnahmen



## Konsortium

### Leibniz-Universität Hannover

- Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEH)  
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung  
Prof. Dr.-Ing. habil. Lutz Hofmann, Sprecher
- Institut für Umweltökonomik und Welthandel (IUW)  
Jun.-Prof. Dr. Michael Hübler

### Universität Göttingen

- Professur für Produktion und Logistik  
Prof. Dr. Jutta Geldermann

### Technische Universität Braunschweig

- Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (ELENIA)  
Fachgebiet Komponenten nachhaltiger Energiesysteme  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
- Institut für Psychologie  
Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB)  
Prof. Dr. phil. habil. Frank Eggert,  
stellvertretender Sprecher

### OFFIS

- FuE Bereich Energie  
Informationssysteme, Energieinformatik und Umweltinformatik  
Prof. Dr. Michael Sonnenschein,  
Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff und  
Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath

### Universität Oldenburg

- Lehrstuhl für Produktionswirtschaft und Umwelt  
apl. Prof. Dr. Niko Paech

## ENSEA: Die Europäische Nordsee-Energie-Allianz

Die europäische Nordsee-Energie-Allianz (European North Sea Energy Alliance, ENSEA) ist im Programm „Capacities“ des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Kommission angesiedelt. ENSEA startete am 01. Oktober 2012 und endete nach einer Laufzeit von drei Jahren am 31.12.2015. Finanziell unterstützte die EU das Projekt mit rund drei Millionen Euro im Rahmen des Programms „Wissensregionen“ (Regions of Knowledge, RoK). Die Hauptziele von ENSEA sind eine verbesserte transnationale Zusammenarbeit zwischen öffentlichen, privaten und akademischen Einrichtungen („Triple Helix“), die Wissenserweiterung zur Integration erneuerbare Energien in das Energiesystem sowie zum Bedarfsmanagement. Darüber hinaus arbeiten

die europäischen Partner an einem Gemeinsamen Aktionsplan, um über Leuchtturmprojekte die Nordseeregion zu einer Exzellenzregion für erneuerbare Energien auszubauen, da sich die Küste der Nordsee rasant zu einem der Energie-Hotspots in Europa entwickelt. Als größte europäische Produktionsstätte stehen der Süden von Norwegen, Nordjütland in Dänemark, der Norden von Deutschland, die Nordniederlande sowie der Osten von Schottland im Mittelpunkt dieser Entwicklung. Alle teilnehmenden ENSEA-Regionen verfügen über enge Verbindungen zwischen Hochschulen, Industrie und regionalen Behörden. Dennoch benötigen die europäischen Herausforderungen mehr „kritische Masse“ (Grundlagenforschung, angewandte Forschung,



Im November 2014 richtete das EFZN einen internationalen ENSEA-Workshop mit der Europäischen Kommission in der Niedersächsischen Landesvertretung in Brüssel aus.

Bildung, Pilotanlagen, Leuchtturmprojekte, Demonstrationsprojekte), um die Erkenntnisse und Informationen rechtzeitig zur Verfügung zu stellen und das Energiesystem nach der politischen Agenda zu modernisieren. Verbesserungen in der Energietechnologie können die Bereitstellungskosten für Energie erheblich reduzieren und gleichzeitig die Qualität der Energiedienstleistungen erhöhen. Gleichwohl ist der gegenwärtig gängige Ansatz fragmentiert und führt durch die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Energieproduktion, Verteilung und Verbrauch zu ineffizienter Ressourcennutzung. Zur Erreichung des EU-Zieles – hin zu einer ressourceneffizienten und kohlenstoffarmen Wirtschaft im Jahre 2050 – ist es unabdingbar, einen integrierten und formalisierten internationalen Ansatz zu verfolgen und Lösungen für die Umsetzung der Energiewende zu schaffen.

### Systemintegration und Balancing fossiler und erneuerbarer Energiequellen

Der Anteil an erneuerbaren Energien im europäischen Energiesystem muss schnell ansteigen, um die Klima-, Energie- und Nachhaltigkeitsziele der EU zu erreichen. Das System der zukünftigen Energiebereitstellung wird sich grundlegend vom heutigen System unterscheiden. Generell wird der Anteil volatiler Energieproduktion aus erneuerbaren Energieträgern signifikant ansteigen. In Nordwesteuropa wird insbesondere eine starke Zunahme von Offshore-Windenergie aus der Nordsee erwartet. Diese landet an der niederländischen und deutschen Küste an. Desweiteren tragen zu einem späteren Zeitpunkt Wellen- und Gezeitenkraftwerke zur Energieproduktion bei. Ein weiterer beträchtlicher Teil der Energieproduktion aus Erneuerbaren wird von skandinavischer Wind- und Wasserkraft erwartet. Wasserkraft steht für 15 Prozent der gesamten europäischen Elektrizitätsproduktion. Dabei ist Norwegen weltweit der sechst größte Produzent von Wasserkraft. Zudem wird weitere Energie lokal produziert etwa durch Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK), Biomasse, Biogas sowie dezentraler Energieproduktion.

Das gegenwärtige Energiesystem ist nicht in der Lage, die fossilen Energieressourcen mit dem steigenden Anteil aus erneuerbaren und dezentralen Energieproduktionsstätten auszutariieren. Es gibt derzeit keine kosteneffiziente Lösung zur Speicherung von Strom. Der Fokus liegt auf Systemintegration zur effizienten Nutzung europäischer Energieressourcen.

Balancing bedeutet vor diesem Hintergrund, den steigenden Anteil fluktuierender und dezentraler Energieproduktion durch das schnelle Zuschalten – ‚back-up‘ – von insbesondere Gaskraftwerken (Biogas und Erdgas) innerhalb des Stromnetzes zu stabilisieren. Weiterhin sind zusätzliche Speichersysteme notwendig, um eine konstante Strombereitstellung zu gewährleisten. Zugleich ist ein Energiemanagementsystem im Zuge des Ausbaus des Stromnetzes notwendig. All diese Innovationen und Systemneuerungen bedürfen eines holistischen Blicks auf das gesamte Energiesystem, den Austausch von Kompetenz und Wissen innerhalb verschiedener Expertisefelder und die Kombination von technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekten im internationalen Kontext.

### Strategische Ausrichtung und Ziele der European North Sea Energy Alliance (ENSEA)

ENSEA zielt darauf ab, ein europäisches Netzwerk aufzubauen und durch das Zusammenführen von Energie Know-how sowie durch das Abstimmen von regionalen, nationalen und europäischen Forschungsprogrammen eine bessere Koordinierung und Praxisumsetzung von Forschungsergebnissen zu ermöglichen. Damit soll ein signifikanter Beitrag zur Erreichung der vorab dargestellten Systemintegration geleistet werden.

Das EFZN ist Partner in ENSEA und verkörpert den wissenschaftlichen Teil der „Triple Helix“ Struktur im niedersächsischen Cluster. Mit dem ENSEA-Verbund treibt das EFZN seine Internationalisierungsstrategie mit dem Ziel voran, funktionsfähige Strukturen zur Einwerbung von EU-Mitteln und zur Bildung einer „European Energy Region of Excellence“ zu entwickeln. Gemeinsam mit der

Wachstumsregion Ems-Achse ist das EFZN Partner in allen Arbeitspaketen und steuert das Projektkonsortium im Arbeitspaket 3 (Gemeinsame Aktionspläne – Joint Action Plans).

Die langfristige Vision der beteiligten ENSEA-Regionen ist es, eine europäische Energie-Exzellenzregion zu entwickeln. Die angestrebte grenzüberschreitende Struktur wird sowohl die sogenannte „Triple Helix“ repräsentieren als auch die Integration von politischer Unterstützung (top-down) und thematischer Zusammenarbeit (bottom-up) durch das Abgleichen der Forschungs-Agenden gewährleisten. Durch die Bündelung der Kräfte werden sich die Nordsee Küstengebiete zusammen mit den Ostsee-Küstenregionen zu einem europäischen Hot-Spot von Energie-Investitionen entwickeln, was wiederum finanzielle Mittel für die Grundlagen- und angewandte Forschung in den teilnehmenden Regionen und weitere Innovationen mit sich zieht.

### Projektaufbau

Die Projektarbeit in ENSEA war in fünf Arbeitspakete (work packages, WP) aufgeteilt.

- WP1: Management und Koordination
- WP2: Strukturanalyse der regionalen Cluster und Integration der Forschungsagenden
- WP3: Definition eines Gemeinsamen Aktionsplans (Joint Action Plan, JAP)
- WP4: Maßnahmen zur Umsetzung eines Gemeinsamen Aktionsplans
- WP5: Nutzung und Verbreitung der Ergebnisse

### Regionale Triple Helix Cluster im ENSEA Konsortium

1. Niederlande: Energy Valley Groningen
2. Niedersachsen: Wachstumsregion Ems-Achse e.V.; Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)
3. Norwegen: Universität Stavanger; Zentrum für Nachhaltige Energielösungen (cenSE); Regionalverwaltungen Lyse und Rogaland
4. Schottland: Energy Technology Partnership (ETP); Scottish Enterprise; Scottish Renewables

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
ENSEA (European North Sea Energy Alliance)

**Fördernde Stelle:**  
Programm „Capacities“ des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Kommission

**Förderkennzeichen:**  
FP7-REGIONS-2012-CT2012-320024-ENSEA-320024

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.10.2012 bis 30.12.2015

**Berichtszeitraum:**  
01.10.2012 bis 31.12.2015

**Internationale Projektleitung:**  
Dr. Koos Lok, Energy Valley Foundation, Groningen

**Projektkoordinator EFZN:**  
Dr. Knut Kappenberg

**E-Mail:** knut.kappenberg@efzn.de

**Internet:** www.ensea.biz



Koos Lok



Knut Kappenberg

## 5. Dänemark: Nordjütlandschen Energieplattform – „Energy Vision“; Universität Aalborg

Der von der Ausschreibung umfasste außereuropäische Partner ist die chinesische Provinz Sichuan, vertreten durch die Sichuan University, mit der im Rahmen der vierten deutsch-chinesischen Energiekonferenz in Chengdu ein Kooperationsabkommen unterzeichnet wurde.

### Projektergebnisse

Zu Beginn des Projekts lag der Schwerpunkt der Arbeit auf der Gesamtanalyse der Innovationskapazitäten in den ENSEA-Regionen. Jede Region entwickelte zunächst einen Bericht, der die regionalen Aktivitäten in Bezug auf Energiesystemintegration beschreibt. Treiber für Innovation, die wichtigsten forschungspolitischen regionalen und nationalen Konzepte, F&E-Aktivitäten sowie regionale Energiesysteme wurden dabei beschrieben. Damit wurden die (relativen) Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der jeweiligen Region identifiziert. Die regionalen Analysen wurden dann in eine Gesamtanalyse der ENSEA Region überführt.

Flankiert wurden die Arbeiten zur Gesamtanalyse durch die Umsetzung eines Kommunikationsplans, der mehrere regionale und interregionale Workshops umfasste. Zudem wurden mehrere ENSEA-Veranstaltungen zur Diskussion und Verbreitung der Ergebnisse durchgeführt.

Die Analysen zeigen mehrere übereinstimmende Ähnlichkeiten zwischen den Regionen: Allgemeine Schwierigkeiten, kleine und mittlere Unternehmen in den Triple-Helix-Innovationsprozess einzubinden; die oft unzureichende Umwandlung akademischer Forschungsergebnisse in marktfähige Produkte; der Mangel an Kommunikation und Koordination zwischen den traditionellen Unternehmen im Bereich fossiler Energien (und den dazugehörigen Akteuren) und den Unternehmen im Bereich der erneuerbaren Energien; ein mangelndes Bewusstsein für die Dringlichkeit der Energiesystemintegration und der allgemeine Mangel an einer gemeinsamen

Vision, wie der Nordseeraum als Energieregion zu entwickeln sei.

Auch sind einige deutliche Unterschiede erkennbar: Die Energy Valley Region hat einen starken Fokus auf Gas, basierend auf Erdgasreserven und – damit verbunden – Produktion, Transport, Lagerung sowie Forschungsdienstleistungen. In jüngster Zeit sind hier zunehmend Innovationsthemen wie „grünes Gas“, kleinmaßstäbliche Anwendung von LNG, Power-to-Gas sowie Gas in Verbindung mit Mobilität zu verzeichnen.

Der Nordwesten von Deutschland erweist sich als stark in den Bereichen erneuerbare Energien und Technologieentwicklung, zum Beispiel bei Windkraftanlagen, Offshore-Technik, Biogasproduktion und Energiespeicherung. Die Energy Valley Region und der Nordwesten Deutschlands teilen sich beide eine starke Ausweitung der Produktionskapazität sowie eine schnell wachsende Aktivität im Bereich Nordsee-Offshore-Wind.

Die Region Rogaland hat erhebliche Offshore-Öl- und Gasaktivität und ist besonders stark im Bereich Wasserkraft (flexible Erzeugung). Die Wasserkapazität von Norwegen ist bereits heute oder aber in naher Zukunft über die Verbindungsleitungen mit den anderen Regionen im ENSEA-Projekt verknüpft und kann damit einen substantiellen Beitrag zum Bilanzlastausgleich leisten. Kohlendioxid-Abscheidung und Kohlenstoffspeicherung wurde als ein weiteres Gebiet von besonderem Fokus und Stärke in Rogaland identifiziert. Schottland hat wie Rogaland ebenfalls einen starken Öl- und Gascluster, der eine gute Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und innovativen Forschergruppen zeigt. Schwerpunkte mit Bedeutung für die Energiesystemintegration sind Stromnetze, Intelligente Stromnetze und Methoden der Systemintegration (Datenmanagement, Informations- und Kommunikationstechnologien, Leistungselektronik). In Bezug auf die erneuerbaren Energien sind die großen potentiellen Ressourcen von Offshore-Wind und Meeresenergie bedeutend für die Region. Onshore-Wind wurde als ein Gebiet von besonders hoher industrieller Aktivität gesehen.

Insgesamt zeigen die untersuchten ENSEA Regionen eine starke Abdeckung aller wichtigen thematischen Bereiche der Energiesystemintegration. Alle Regionen haben einen starken Fokus auf Technologieentwicklungen bei erneuerbaren Energien mit besonderer Spezialisierung auf Biomasse und Onshore-Wind. Fast jede untersuchte Technologie für erneuerbare Energien wurde als ein regionaler Stärkefaktor identifiziert. Einzig solare und insbesondere geothermische Technologien waren außer in Niedersachsen nicht im Fokus der Regionen.

Nach Beendigung des zweiten Arbeitspaketes verschob sich der Fokus der Aktivitäten auf die Entwicklung regionaler Innovationsstrategien und zur Entwicklung von Aktionsplänen für jede Region. Diese bestehen unter anderem aus einer Innovationsstrategie für die einzelnen Regionen sowie einer Vielzahl von Projektideen, die in regionale Aktionspläne mündeten, aus denen wiederum ein Gemeinsamer Aktionsplan (Joint Action Plan, JAP) für die ENSEA-Region als Ganzes entwickelt wurde. Wichtigstes Ergebnis dieses JAP ist die Identifikation gemeinsamer Clusteraktivitäten, die aus einer Sammlung von mehr als 160 Projektideen entwickelt wurden.

Folgende Clusteraktivitäten und Projekte sollen auf der Grundlage des Gemeinsamen Aktionsplans zukünftig im Rahmen der Verstärkung des ENSEA-Clusters ausgearbeitet werden:

- Aufbau von Programmen für Bildungszusammenarbeit und Austausch von Wissen zwischen verschiedenen Universitäten und Bildungseinrichtungen rund um die Nordsee
- Schaffung von KMU-Netzwerken rund um die Nordsee
- Aufbau von Netzwerken nachhaltiger Kommunalentwicklung rund um die Nordsee
- Einrichtung eines gemeinsamen Forschungspools, Austauschprogramme für Doktoranden und Post-Doktoranden
- Projekte zur Flexibilisierung norwegischer Wasserkraftanlagen und deren Integration in das Nordsee-Energiesystem
- Projekte zur Nachnutzung vorhandener Infrastruktur von Öl- und Gasplattformen in der

Nordsee für moderne regenerative Energieerzeugungsanlagen

- Projekte zur Technologie-Entwicklung neuer Speicheroptionen, z.B. Power-to-Gas
- Projekte zur modellbasierten Entscheidungshilfe für politische Entscheidungsträger (Generaldirektion Energie, Generaldirektion Maritime Angelegenheiten) bei der Identifizierung und Analyse von wirksamen Strategien für den Übergang hin zu einem effizienten kohlenstoffarmen Energiesystem
- Transfer der Forschungsergebnisse zur Systemintegration erneuerbarer Energien
- Weiterer Aufbau und Stärkung nachhaltiger Partnerschaften zwischen Wissenschaft UND Wirtschaft UND Politik in den ENSEA-Regionen und der Nordseeregion in ihrer Gesamtheit
- Erweiterung des ENSEA-Verbundes auf andere Regionen/ Länder

### Projektpartner

#### Projektkoordination:

- Energy Valley Foundation, Groningen, Niederlande

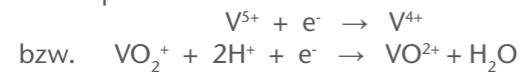
#### Forschungsstellen:

- Hanze University Groningen, Niederlande
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- University Stavanger und Centre for sustainable energy solutions (cenSE), Norwegen
- University Strathclyde mit Energy Technology Partnership (ETP), Schottland

## Redox-Flow-Batterien

Am Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT, Professor Ulrich Kunz, Professor Thomas Turek) werden seit 2009 Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Redox-Flow Batterien (RFB) durchgeführt. In derartigen Batterien wird Energie in Form von Ionenlösungen gespeichert, die durch Redoxreaktionen an Elektroden ihre Wertigkeit ändern können, wodurch die Batterie aufgeladen bzw. entladen wird. Ein besonders erfolgversprechendes Beispiel für diesen Batterietyp ist die Vanadium Redox-Flow Batterie (VRFB), bei der ausschließlich Vanadiumionen der Wertigkeitsstufen +2 bis +5 in schwefelsaurer Lösung eingesetzt werden. Die in der Batterie ablaufenden Reaktionen sind beim Entladen

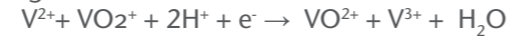
an der positiven Elektrode:



und an der negativen Elektrode:



Damit ergibt sich als Summenreaktion:



Beim Laden laufen die Reaktionen vollständig reversibel in umgekehrter Richtung ab. Ein großer Vorteil der RFB ist die Trennung von Energieinhalt, der durch die Größe der Vorratstanks für die Elektrolytlösungen eingestellt werden kann, und Leistung, die sich durch die Fläche der Elektroden in der Zelle bzw. im Zellenstapel (Stack) ergibt. Das Prinzip einer VRFB ist in Abbildung 1 dargestellt.

Ein weiterer Vorteil der Energiespeicherung in Form von gelösten Ionen im Gegensatz zu anderen Speicherbatterien ist, dass kein Feststoff auf den Elektroden erzeugt wird. Deshalb, kann eine RFB mehr als 10.000 Zyklen erreichen, was deut-

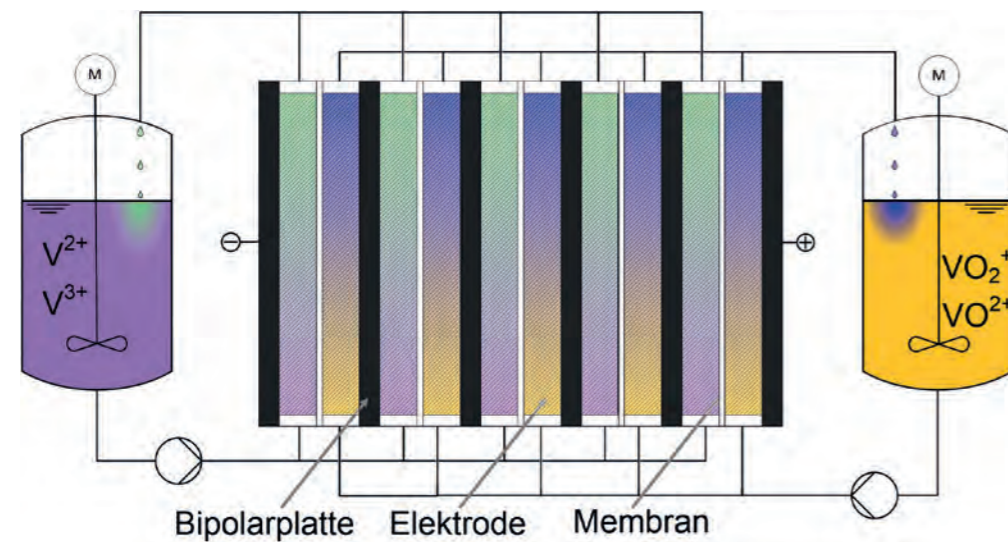


Abbildung 1: Prinzip einer Vanadium Redox-Flow Batterie mit Vorratstanks für den negativen ( $V^{2+} / V^{3+}$ ) und positiven ( $V^{4+} / V^{5+}$ ) Elektrolyten.

## Daten zum Projekt

Projekt	Finanzierung	Partner	Bearbeiter	Projektleiter	Laufzeit
Entwicklung von Elastomer-Bipolarplatten für den Einsatz in vanadiumsalzbasierten Redox-Flow Batterien	EFRE	Eisenhuth	Dr. dos Santos	Prof. Kunz	7/2009 – 6/2012
Scale-up von Redox-Flow Batterien I	Industrie	Thyssen-Krupp Industrial Solutions	M. Becker	Prof. Turek	1/2012 – 4/2015
Neuartige, bipolarplattenintegrierte Dichtkonzepte und neuartige Materialien für Bipolarplatten zur Effizienzsteigerung von Redox-Flow Batterien	BMWi	Eisenhuth	Dr. dos Santos	Prof. Kunz	7/2012 – 6/2015
Einsatzmöglichkeiten von porösen Glasmembranen in Redox-Flow Batterien	DFG	Prof. Enke, Universität Leipzig	H. Mögelin	Prof. Kunz	4/2015 – 3/2018
Scale-up von Redox-Flow Batterien II	Industrie	Thyssen-Krupp Industrial Solutions	K. Schafner	Prof. Turek	5/2015 – 4/2018
Neuartige großflächige Bipolarplatten im Extrusionsverfahren für Redox-Flow Batterien	BMWi	Centroplast, Eisenhuth, Thyssen-Krupp Industrial Solutions, ZBT	Dr. dos Santos, E. Prumbohm	Prof. Kunz, Prof. Turek	11/2015 – 10/2018



Thomas Turek



Ulrich Kunz

lich über den heute erreichbaren Zyklenzahlen von beispielsweise Li-Ionenbatterien liegt.

Aufbauend auf früheren Erfahrungen mit Direkt-methanol-Brennstoffzellen und energiesparenden Elektrolyseverfahren mit Brennstoffzellen-Elektroden konnte das ICVT seit 2009 eine Reihe von Drittmittelprojekten mit einem Gesamtumfang von circa 2,4 Millionen Euro einwerben, die in der Arbeitsgruppe des ICVT am Standort EFZN in Goslar durchgeführt werden.

Das ICVT verfügt im Bereich der Redox-Flow Batterien mittlerweile über umfassende Kompetenzen bei der Bewertung von Materialien (Bipolarplatten, Kohlenstoffelektroden, Separatoren und Dichtungen), der Bestimmung kinetischer Daten der elektrochemischen Reaktionen sowie der mathematischen Modellierung von Elektroden, Zellen und Batteriesystemen. Darüber hinaus werden Redox-Flow Batterien, auch im Vergleich zu anderen Batterietypen, technisch und ökonomisch bewertet.

#### Ausgewählte Projektergebnisse

**BMW-Projekt „Neuartige, bipolarplattenintegrierte Dichtkonzepte und neuartige Materia-**

#### lien für Bipolarplatten zur Effizienzsteigerung von Redox-Flow Batterien“

In Redox-Flow Batterien werden bisher Graphitplatten eingesetzt, die mit einem separaten Kunststoffrahmen verbunden werden müssen. Diese Rahmen gewährleisten die mechanische Integrität des Stacks und sorgen für die Medienzufuhr auf die Kathode und die Anode. Dieser Aufbau ist relativ komplex und anfällig für Fehler, zum Beispiel mechanische Instabilität, Montagefehler, Undichtigkeiten oder thermische Ausdehnung. Ziel dieses Projekts war die Entwicklung einer integrierten Platte, in der die Mono- beziehungsweise Bipolarplatte und der Rahmen entweder aus einem Material bestehen oder in ein gemeinsames Bauteil integriert sind (bei einer Monopolarplatte auch der Stromkollektor). Diese Integration ermöglicht eine einfache Montage, reduziert die Zahl der Komponenten und bietet somit mehr Zuverlässigkeit und geringere Kosten. Selbstverständlich muss das Material aus kostengünstigen Ausgangsstoffen bestehen und verarbeitungsfreundlich sein. In Abbildung 2 ist das Muster einer solchen Platte, wie sie im Verlauf des Projektes entwickelt wurde, zu sehen.

Zum Erreichen einer gleichmäßigen elektrochemischen Leistungsfähigkeit über die gesamte Plat-



Abbildung 2: Im Spritzguß gefertigter Rahmen mit angegossenem Monopolarplatte und Stromkollektor.

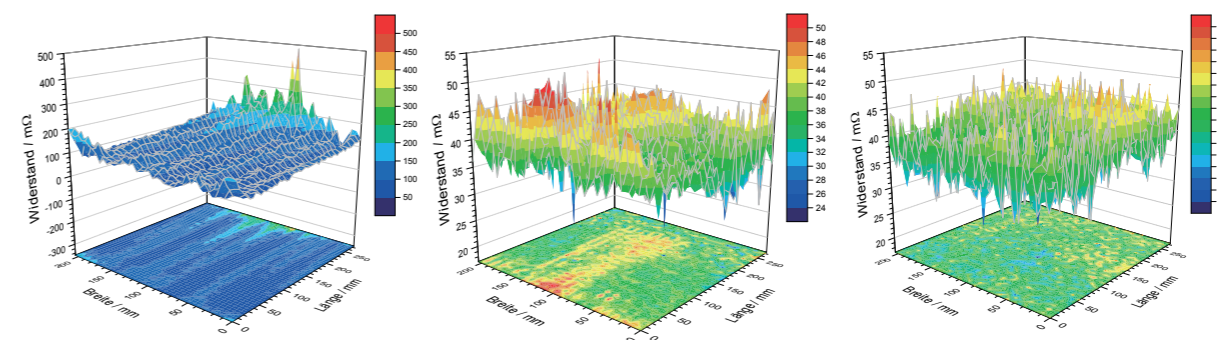


Abbildung 3: Leitfähigkeitsprofil für spritzgegossene Bipolarplatten: unbearbeitet (links), bearbeitet (Mitte) und gepresst (rechts).

tenfläche sind Bipolarplatten erforderlich, die eine hohe und gleichförmige Elektronenleitfähigkeit über der gesamten Oberfläche aufweisen. Hierzu wurde ein Leitfähigkeitsscanner entwickelt, der ein Leitfähigkeitsprofil der Bipolarplatte liefert. Ein Beispiel für diese neuartige zerstörungsfreie Leitfähigkeitsbewertung von Bipolarplatten ist in Abbildung 3 dargestellt.

Durch Leitfähigkeitsmessungen kann zum Beispiel erkannt werden, dass eine spritzgegossene Platte an der Seite der Einfüllöffnungen der Form immer einen Bereich hohen Widerstandes aufweist und dass im Formenpressen hergestellte Platten gleichförmiger sind und einen geringeren Widerstand aufweisen als spritzgegossene Platten. Diese Informationen können Hersteller von Bipolarplatten nutzen, um die Formen fürs Spritzgießen beziehungsweise Pressen zu optimieren. Die am EFZN entwickelte zerstörungsfreie Scanner-Technik ist besonders wichtig, wenn sehr große Bipolarplatten bewertet werden sollen.

#### Industrieprojekte „Scale-up von Redox-Flow Batterien I + II“

Im Rahmen dieser Projekte sollen große Zellen mit Flächen zwischen 2 und 3 m<sup>2</sup> entwickelt werden, wie sie aus der Elektrolysetechnik der chemischen Industrie bekannt sind. Dazu sind neue Konzepte erforderlich, da die bisher üblichen Konstruktionsprinzipien im Bereich der Vanadium Redox-Flow Batterien nur für kleine Zellen bezie-

ungsweise Zellenstapel bis zu einer Fläche von circa ¼ m<sup>2</sup> anwendbar sind. Bei größeren Zellen würde beispielsweise bei Anwendung der üblichen Technik der Druckverlust für die Elektrolyten beim Durchströmen der porösen Kohlenstoffelektroden viel zu groß werden. Hierzu wurden umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen am EFZN durchgeführt. Abbildung 4 zeigt beispielhafte Ergebnisse der Modellierung von 1 m hohen VRFB Zellen, bei denen wie bisher in der Technik üblich eine poröse Elektrode über die volle Zellenhöhe durchströmt wird.

#### Projektpartner

##### Projektkoordination

- TU Clausthal
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

##### Beteiligte Institute

- Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik
- Dr. Jochen Kerres, Universität Stuttgart
- Prof. Joachim Schmidt, Dennis Dürkop, Ostfalia
- Prof. Sabine Beuermann, Dr. Marco Drache, TU Clausthal

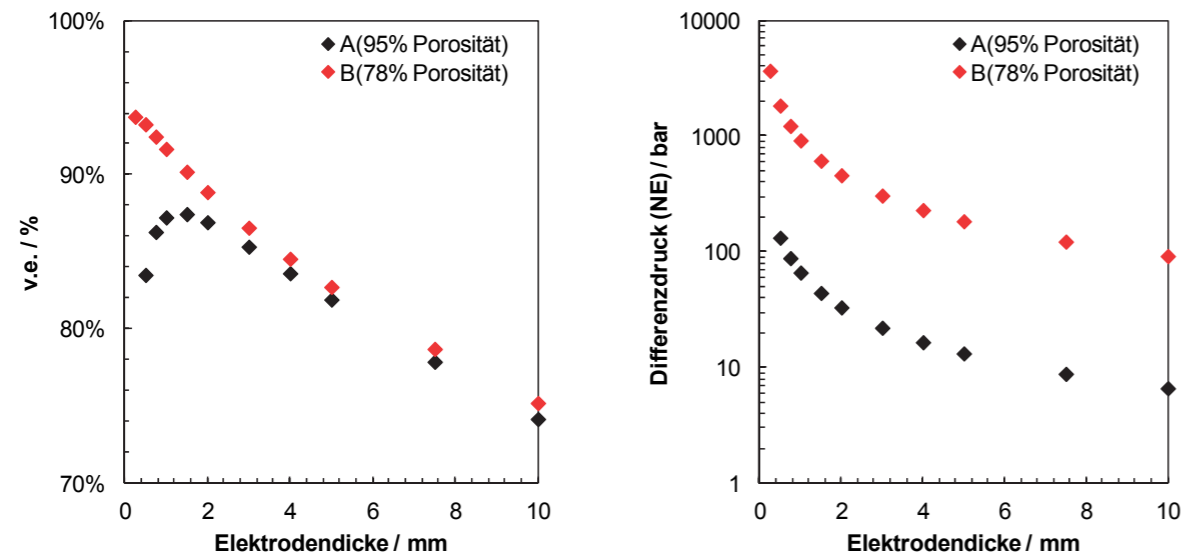


Abbildung 4: Spannungswirkungsgrad (v.e.) einer VRFB Zelle mit 1 m Höhe (links) und entsprechender Druckverlust des negativen Elektrolyten (rechts) für zwei unterschiedlich komprimierte Kohlenstoffelektroden in Abhängigkeit von der Elektrodendicke.

Bei einer Elektrode mit einer Porosität von 95 Prozent liegt die optimale Dicke der Elektrode für einen möglichst hohen Spannungswirkungsgrad (v.e.) bei ungefähr 1,5 mm. Dabei tritt allerdings ein Druckverlust des höher viskosen negativen Elektrolyten von 30 bar auf. Stärker komprimierte Elektroden zeigen insbesondere bei geringen Dicken einen deutlich höheren Wirkungsgrad, sind aber nicht mehr zu durchströmen. Daraus kann abgeleitet werden, dass andere Durchströmungsprinzipien (zum Beispiel Strömungskanäle) für den Elektrolyten gewählt werden müssen. Entsprechende geänderte Strömungsführungen sind bereits erfolgreich getestet worden und werden momentan vom Industriepartner in den Pilotmaßstab überführt.

#### DFG-Projekt „Einsatzmöglichkeiten von porösen Glasmembranen in Redox-Flow Batterien“

Bisher werden dem Stand der Technik nach ausschließlich Polymerelektrolytmembranen in Redox-Flow Batterien verwendet. Auf der Kathode ist der Elekt-

rolyt ein starkes Oxidationsmittel, sodass im Laufe der Zeit ein Angriff auf das Polymer der Membran erfolgt. Poröse Gläser sind unter den Betriebsbedingungen einer Redox-Flow Batterie stabil, so dass sich längere Standzeiten erreichen lassen. Gemeinsam mit der Universität Leipzig werden Proben maßgeschneiderter poröser Gläser als Separatoren und in oberflächenfunktionalisierter Version als Membranen in Testzellen bewertet (Abbildung 5). Erste Ergebnisse zeigen, dass poröse Gläser eine aussichtsreiche Alternative zu polymerbasierten Membranen sein könnten.

#### BMWi-Projekt „Neuartige großflächige Bipolarplatten im Extrusionsverfahren für Redox-Flow Batterien“

Die Leistung von RFB hängt von der Größe der aktiven Fläche der elektrochemischen Zellen und damit direkt von der Größe der Bipolarplatte ab.

Diese zu vergrößern, hat sich das Konsortium aus Industrie (Centroplast, Eisenhuth und ThyssenKrupp Industrial Solutions) und Forschung (EFZN

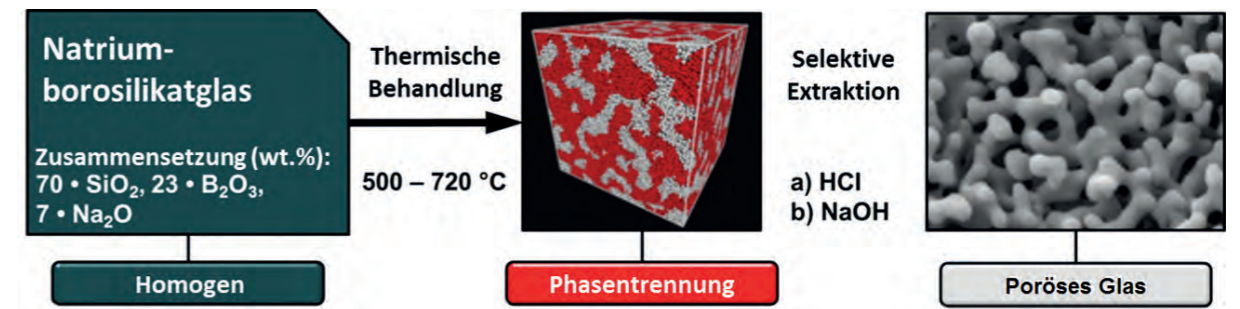


Abbildung 5: Erzeugung poröser Gläser für Membranen von Redox-Flow-Batterien

und ZBT) zum Ziel gesetzt. Beim derzeitigen Stand der Technik misst die Zellfläche von kommerziellen RFB ca. 0,1 m<sup>2</sup>; die Leistung je Zelle liegt damit bei nur etwa 80 Watt. Um zukünftig auch großtechnische, industrielle Anwendungen realisieren zu können, soll die aktive Zellfläche auf 2,7 m<sup>2</sup> vergrößert werden, also auf das mehr als 30fache. Durch Verschaltung einiger hundert bis mehrerer tausend dieser Zellen zu größeren Einheiten erhält man einen Energiespeicher im zwei- bis dreistelligen MW-Bereich. Dieses Prinzip ist nicht neu und wird bereits heute in anderen Elektrolyseanwendungen, zum Beispiel in der Chlorproduktion, praktiziert.

Im Rahmen des nun gestarteten Projekts zur Entwicklung eines Herstellungsverfahrens neuartiger Bipolarplatten ist Eisenhuth für die Übertragung der Forschungsergebnisse in die industrielle Fertigung und für die Produktion von flächenmäßig kleinen Bipolarplatten verantwortlich. Das ZBT übernimmt mit Unterstützung durch Eisenhuth die Auswahl und Weiterentwicklung von Materialien und Werkstoffen, die hinsichtlich der neuen Technologie für die Herstellung der Bipolarplatten geeignet sind.

Der Kunststoffspezialist Centroplast wird das Scale-up der Bipolarplatten übernehmen und die Machbarkeit ihrer Herstellung im m<sup>2</sup>-Maßstab mittels der neuen Technologie demonstrieren. Dabei liegt der Schwerpunkt vor allem darauf, die Bipolarplatten fehlerfrei und in hoher Qualität reproduzierbar in einem robusten Prozess her-

zustellen. Während des Entwicklungsprozesses werden die Forschungsinstitute ZBT und EFZN die Herstellung der Bipolarplatten durch Eisenhuth und Centroplast mithilfe umfangreicher Materialcharakterisierungen und elektrochemischer Untersuchungen unterstützen.

ThyssenKrupp Industrial Solutions übernimmt schließlich die Einbindung der neu entwickelten Bipolarplatten in RFB sowie die weitere Optimierung des Zelldesigns hin zu großtechnischen Anwendungen. Das Gemeinschaftsprojekt zur Herstellung der Bipolarplatte wird von Eisenhuth koordiniert.

#### Kooperationspartner und Weiterführung des Arbeitsgebietes

Arbeitsgruppen der Universität Stuttgart, der Ostfalia und der TC/TU Clausthal entwickeln polymerbasierte Membranen auf ganz unterschiedlichen chemischen Wegen. Am EFZN werden Proben dieser Membranen elektrochemisch/verfahrenstechnisch bewertet. Mit Universität Stuttgart wurde bereits ein gemeinsamer Antrag bei der DFG eingereicht. Ein weiteres interessantes Thema ist die Entwicklung von Redox-Flow-Batterien, die auf organischen Molekülen wie beispielsweise Chinonen basieren. Dazu kooperiert das ICVT mit dem Institut für Organische Chemie (Professor Dieter Kaufmann) an der TU Clausthal. Auch auf diesem zukunftsreichen Gebiet sind Anträge für Forschungsprojekte in der Vorbereitung.

# AKZEPTANZ – Die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende

## Untersuchte Fragestellungen

Der mit der Energiewende verbundene Umbau des deutschen Energieversorgungssystems verursacht Kosten, die innerhalb der deutschen Gesellschaft zu verteilen sind. Während die ökonomische Theorie die getrennte Behandlung von Fragen der Effizienz und Gerechtigkeit postuliert, zeigen verhaltensökonomische Untersuchungen, dass subjektives Gerechtigkeitsempfinden und wahrgenommene Mehrbelastungen die Präferenzen für politische Projekte bestimmen. Das Forschungsprojekt AKZEPTANZ untersucht Einflussgrößen auf die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende. Das Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens AKZEPTANZ besteht in der Herleitung von empirisch belastbaren Aussagen zur gesellschaftlichen Akzeptanz der

Energiewende auf Basis einer systematischen Erfassung von Klimaschutzpräferenzen auf der Individualebene. AKZEPTANZ verfolgt einen positiven wissenschaftlichen Ansatz in dem Sinne, dass die Wirkung unterschiedlicher Gestaltungsparameter der Energiewende auf deren Akzeptanz ergebnisoffen untersucht wird. Das Forschungsvorhaben verbindet gerechtigkeits-theoretische Grundlagenforschung mit den empirischen Methoden der Experimentalökonomik und der Panelbefragung. Dabei werden positive geäußerte und aufgedeckte Präferenzen der Bevölkerung zur Formulierung normativer Handlungsanweisungen und konkreter Politikempfehlungen genutzt.

## Organisation und Struktur

Das Forschungsprojekt AKZEPTANZ ist ein im Rahmen des Forschungsschwerpunktes für Nachhaltige Entwicklung (FONA) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Verbundprojekt mit einer Laufzeit vom 1.06.2013 bis 31.05.2016. Das Verbundprojekt vereint ökonomische und philosophische Kompetenzen an drei Standorten.

Koordiniert wird das Forschungsvorhaben am EFZN von Professor Dr. Roland Menges, Institut für Wirtschaftswissenschaften, Technischen Universität Clausthal. Die Koordination umfasst die Planung, Steuerung und Abstimmung der in fünf Arbeitspaketen organisierten Forschung. Die thematischen Schwerpunkte der Arbeitspakete sind im Einzelnen:

**AP Gerechtigkeit:** Gerechtigkeitstheoretische Grundlagenforschung: Akzeptabilität von Mehrbelastungen, generelle ethische Einstellung zur Energiewende, Einfluss globaler Gerechtigkeitsfragen.

**AP Kosten:** Empirische Bestimmung der Verteilungswirkung der Energiewende (forsa-Haushaltspanel), Messung der geäußerten Akzeptanz von Kostensteigerungen.

**AP Verhalten:** Empirische Bestimmung von Klimaschutz- und Gerechtigkeitspräferenzen, Zahlungsbereitschaft für Klimaschutz bei Variation sozialpolitischer Rahmenbedingungen.

**AP Aggregation:** Methodischer Verbund der in Einzeluntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse, Zusammenführung und Interpretation der Forschungsergebnisse.

**AP Politik:** Formulierung politischer Handlungsempfehlungen auf Grundlage der aggregierten Arbeitsergebnisse.

Als Ausdruck eines ganzheitlichen, transdisziplinären Forschungsansatzes entstehen die aus dem Forschungsprozess abgeleiteten Politikempfehlungen unter Einbezug eines Praxisbeirats. Der Praxisbeirat umfasst die folgenden Vertreter von Energieunternehmen und -verbänden, Verbraucherverbänden, Umwelt- und Wohlfahrtsorganisationen sowie Kommunen und Ministerien. (Tabelle 1)

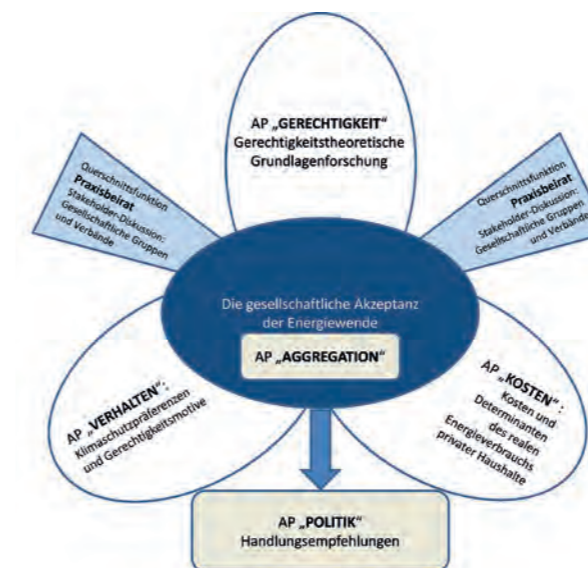


Abbildung 1: Arbeitspakete und Organisation

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Akzeptanz – Die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende

**Fördernde Stelle:**  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

**Förderkennzeichen:**  
01 UN 1203 (A-D)

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.06.2013 bis 31.05.2016  
(Verlängerung beantragt)

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr. Roland Menges

**Projektkoordinator:**  
Prof. Dr. Roland Menges

**E-Mail:** roland.menges@tu-clausthal.de  
gregor.beyer@tu-clausthal.de

**Internet:** www.akzeptanz.tu-clausthal.de



Roland Menges

Tabelle 1: Mitglieder des Praxisbeirats

Rubrik	Mitglied des Praxisbeirats	Institution
Verbraucherzentralen, Vereine und Gewerkschaften	Udo Sieverding	Verbraucherzentrale NRW
	Prof. Dr. Michael Jischa	Deutsche Gesellschaft des Club of Rome
	Dr. Holger Krawinkel	Verbraucherzentrale Bundesverband
	Frederik Moch	Deutsche Gewerkschaftsbund
	Michael Rothkegel	BUND Landesverband Hessen
Energieunternehmen	Guido Obschernikat	RWE AG
	Dr. Stefan Ulreich	E.ON AG
	Dr. Sebastian Tschentscher	Lichtblick SE
Verbände der Energiewirtschaft	Michael Nickel	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
	Nicole Knudsen	Bundesverband Windenergie
Behörden und öffentliche Verwaltung	Helge Spehr	Stadtwerke Rendsburg
	Andreas Breitner	Innenministerium Schleswig Holstein
	Andreas de Vries	Gemeindewerke St. Michel-Energie GmbH
	Dr. Gustav Sauer	Ministerium für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr (SH)

### Zwischenergebnisse

Die bisherigen empirischen Ergebnisse über die Verteilungswirkung der Energiewende sowie die geäußerte Akzeptanz zukünftiger Kostensteigerungen werden aus der Befragung von 7.800 Haushalten im Rahmen des forsa-Haushaltspanels abgeleitet. Mit drei Erhebungszeiträumen von 2006 bis 2008, 2009 bis 2010 und 2011 bis 2013 wurden umfangreiche Informationen über den Energieverbrauch einer repräsentativen Stichprobe gewonnen, die Verbrauchsdaten, Kosten und Preise aller relevanten Energieträger beinhaltet. Eine Analyse dieser Daten zeigt, dass die Energiekostenbelastung aller Haushalte in den vergangenen Jahren angestiegen ist. Insbesondere einkommensschwache Haushalte sind von den steigenden Energiekosten betroffen, da ein zunehmend höherer Anteil des Einkommens zur Finanzierung des Wärme- und Elektrizitätsbedarfs eingesetzt werden muss.

Weitere Ergebnisse wurden aus der Spiegelung des individuellen Verhaltens vor geäußerten Einstellungen abgeleitet. Zwei incentivierte Experimente wurden entwickelt, die unterschiedliche Forschungsfragen in kontrollierten Bedingungen und unter alternativen institutionellen Rahmen und sozialpolitischen Konstellationen anreizkompatibel beantworteten. Das erste Experiment galt der Messung individueller Verteilungspräferenzen für die Kosten der Energiewende in heterogenen Gruppen. Das zweite Experiment prüfte, wie unterschiedliche staatliche Maßnahmen private Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen beeinflussen.

Beide Experimente wurden über den Zeitraum von fünfzehn Monaten in insgesamt sechs Erhebungen verwendet. Um möglichst valide Antworten auf die untersuchten Forschungsfragen zu erhalten, wurden die Hauptuntersuchungen in Bremen und Braunschweig mit Besuchern von Einkaufszentren durchgeführt (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Datenerhebung im Feld (Experimentallabor der TU Clausthal/EFZN in den Schlossarkaden Braunschweig, 12.03.2015)

Ogleich die Stichproben nicht repräsentativ für Bundesdeutschland waren, bildeten die demographischen Merkmale der rund 1.000 Untersuchungsteilnehmer wichtige Grundzüge der deutschen Bevölkerung ab: 17 Prozent der Teilnehmer waren mindestens 51 Jahre alt; 27,2 Prozent der Teilnehmer hatten ein monatliches Nettoeinkommen von weniger als 1.000 Euro (nach Ausschluss von Schülern und Studenten 12,8 Prozent); 4,8 Prozent der Teilnehmer waren arbeitssuchend beziehungsweise nicht berufstätig und 7,2 Prozent der Probanden gaben sich als Rentner beziehungsweise Pensionäre zu erkennen. Insbesondere wurde das erklärte Ziel erreicht, die Präferenzen älterer und einkommensschwächerer Individuen zu ermitteln.

Die in den Experimenten mit Fragebögen unternommenen Einstellungsmessungen bestätigten bestehende Forschungsergebnisse. So gaben 71 Prozent der Probanden an, dass der Klimawandel aktiv zu bekämpfen sei. 70 Prozent der Probanden waren bereit, für die Bekämpfung des Klimawandels auch finanzielle Mehrbelastungen zu tragen und äußerten eine hohe Akzeptanz der Energiewende. Gleichwohl empfanden 30 Prozent der Probanden die derzeitige Kostenbelas-

tung durch die Bekämpfung des Klimawandels als zu hoch.

Die erhobenen Präferenzen über die bevorzugte Verteilung der Kosten der Energiewende auf heterogene Haushaltstypen offenbarten den Wunsch nach einer an der Einkommenshöhe gemessenen proportionalen Kostenverteilung. Diese Präferenz bleibt bestehen, wenn eine soziale Sicherung für einkommensschwache Haushalte eingeführt wird und ändert sich ebenfalls nicht, wenn statt der Kosten der Energiewende die Belastung durch ein beliebiges öffentliches Projekt zur Verteilung steht. Die vom Median der Gesellschaft präferierte Kostenverteilung ändert sich jedoch signifikant, sobald die Höhe der Kosten der Energiewende unsicher ist: In einer Situation, in der die genaue Höhe der Kosten nicht bekannt ist, wählen Untersuchungsteilnehmer ungeachtet ihrer Einkommenshöhe eine regressive Kostenverteilung, in der Haushalte mit einem geringeren Einkommen einen relativ höheren Anteil ihres Einkommens für die Finanzierung der Energiewende aufwenden müssen. Ist nicht die Höhe der Kosten, sondern die eigene Einkommensposition ungewiss, tritt ein entgegengesetztes Bild zutage, und Untersuchungsteilnehmer präferieren eine progressive Kostenverteilung.



Die zweite Experimentalreihe zur Evaluation der Wirkung staatlicher Maßnahmen auf private Energieeffizienzinvestitionen bildete ebenfalls Haushalte mit unterschiedlichen Einkommenshöhen ab. In Abwesenheit staatlicher Maßnahmen verhielten sich Untersuchungsteilnehmer unabhängig von relativen Einkommenspositionen kooperativ in dem Sinne, dass Investitionen das individuell-nutzenmaximierende Niveau überstiegen. Die Gewährung von Subventionen zur Förderung von Investitionen in Form pauschaler Zuschüsse wirkte kooperationsmindernd; Haushalte, die einen Investitionszuschuss erhielten, reduzierten ihre Investitionen. Es konnte gezeigt werden, dass der Mitnahme-Effekt auch bei variierender Subventionshöhe besteht. Dennoch zeigten sich Subventionen unter bestimmten Voraussetzungen geeignet, private Investitionen in Energieeffizienz anzuregen: Ein signifikanter Investitionsanstieg der Empfänger staatlicher Subventionen war zu beobachten, wenn Subventionen nicht beschränkt in Form pauschaler Zuschüsse, sondern in der Höhe unbegrenzt durch konstante marginale Zuzahlungen ausgestaltet waren. Dabei war zu beobachten, dass nicht allein die Höhe der Subvention, wohl aber die Anreizwirkung den Investitionsanstieg determinierte. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Finanzierungsmechanismen zur Deckung der aus staatlichen Subventionen resultierenden Staatsausgaben das Investitionsverhalten der Untersuchungsteilnehmer nicht beeinflussen.

#### Ausblick auf zukünftige Forschungsaktivitäten

Die im Arbeitspaket Kosten aufgezeigte regressive Verteilungswirkung steigender Strompreise wird sich auch in Zukunft fortsetzen, falls Deutschland dem geplanten Ausbaupfad der erneuerbaren Energien folgt. Dies birgt allerdings die Gefahr eines langfristigen Rückgangs der gesellschaftlichen Akzeptanz der Energiewende, insbesondere wenn es nicht gelingt, die regressiven Effekte abzumildern.

Die experimentellen Ergebnisse über die präferierte Verteilung der mit der Energiewende verbundenen Kosten unterstreichen, dass die Belas-

tung der Haushalte unter dem Gesichtspunkt der Tragfähigkeit für alle Einkommensgruppen gestaltet werden sollte. Gleichwohl zeigt sich, dass die Energiewende als eine gesamtwirtschaftliche Aufgabe wahrgenommen wird. Dies impliziert Präferenzen für eine soziale Sicherung einkommensschwacher Haushalte. In der umweltpolitischen Kommunikation liegt ein entscheidender Faktor für die öffentliche Beurteilung der Energiewende in der glaubwürdigen politischen Kommunikation der Kosten der Energiewende.

Zusätzliche Forschungsaktivitäten richten sich verstärkt auf die Frage, ob und inwiefern bestimmte Verteilungswirkungen die Zustimmung zur Energiewende beeinflussen. Im Kontext staatlicher Maßnahmen zur Steigerung privater Energieeffizienzinvestition ist bspw. zu untersuchen, wie sich staatliche Informations- und Beratungsangebote auf individuelle Investitionsentscheidungen auswirken. Zudem wird konkret eine verbreiterte Anwendung der Methoden der experimentellen Wirtschaftsforschung bei der Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Energiewende angestrebt. Hierzu wird derzeit unter dem Dach der fona-Forschung des BMBF eine Kooperation zwischen der TU Clausthal/EFZN mit der FH Augsburg im Bereich game-Engineering und Spieldesign entwickelt.

#### Veröffentlichungen und Arbeitspapiere

Die genannten Zwischenergebnisse sind deutscher und englischer Sprache veröffentlicht:

- Frondel, M., Sommer, S. (2014): Energiekostenbelastung privater Haushalte - Das EEG als sozialpolitische Zeitbombe?. List Forum für Wirtschafts- und Finanzpolitik 40 (4).
- Frondel, M., Sommer, S., Vance, C. (2015): The Burden of Germany's Energy Transition: An Empirical Analysis of Distributional Effects. Economic Analysis and Policy 45.
- Menges, R., Beyer, G. (2015): How to Support Energy Efficiency - An Experimental Investigation of Individual Preferences, in: Tagungsband des Workshops der GOR-Arbeitsgruppe „Entscheidungstheorie und -praxis“ am 27. und 28. März 2014 in Clausthal-Zellerfeld.

## Korrelation von Modell- und kommerziellen Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien mittels *In-situ*-Bestimmung thermodynamischer und kinetischer Daten

#### Projekthintergrund

Dieses Projekt ist in das Schwerpunktprogramm 1473 „WeNDeLIB“ (Werkstoffe mit neuem Design für Lithium-Ionen-Batterien) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingebettet. Bearbeitet wird es gemeinsam vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (Forschungsbereich Grundlagen neuer Energietechnologien, Arbeitsgruppe Prof. Fritze) und der Technischen Universität Ilmenau (Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Arbeitsgruppe Prof. Bund).

#### Grundkonzept

Die Kenntnisse der kinetischen Einsatzgrenzen und der thermodynamischen Stabilität werden zur Herstellung von Lithium-Batterien mit hoher Kapazität und langer Lebensdauer benötigt.

Im Rahmen dieses Projektes wird mit der Dünnschicht-Kalorimetrie ein neues Messverfahren realisiert, das die Untersuchung der Temperatur und der Enthalpie von Phasenübergängen als Funktion der Zusammensetzung und des Lithium-Gehaltes ermöglicht. Dünne Schichten der Elektrodenmaterialien werden auf der Oberfläche eines piezoelektrischen Resonators (Langasit-Einkristall) abgeschieden, der sehr kleine Temperaturschwankungen von circa 10 mK detektieren kann. Das Auflösungsvermögen für Energieänderungen dieses neu entwickelten Konzeptes liegt bei etwa 0,7 mJ. Neben diesem Verfahren werden gleichzeitig Untersuchungen mittels Röntgen-Diffraktometrie und Impedanzspektroskopie durchgeführt. Im Rahmen des Projektes werden daher Methoden und Materialien entwickelt, die disziplinübergreifend auch bei anderen Batterie-Projekten des EFZN einsetzbar sind.

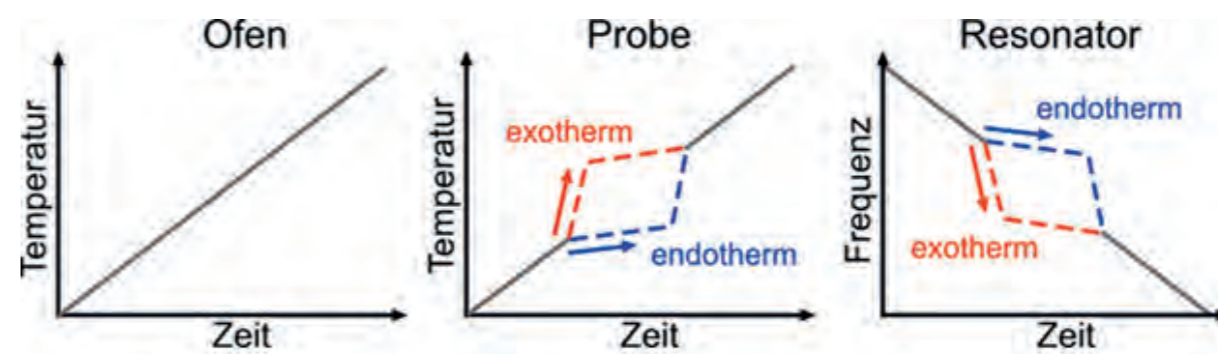


Abbildung 1: Schematisches Messprinzip der Dünnschicht-Kalorimetrie

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

Linking of Model and Commercial Active Materials for Lithium Ion Batteries by In-situ Determination of Thermodynamic and Kinetic Data

### Fördernde Stelle:

Deutsche Forschungsgemeinschaft

### Förderkennzeichen:

SPP 1473, FR 1301/16-1 und -2

### Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2011 bis 30.04.2017

### Berichtszeitraum:

01.01.2011 bis 30.08.2015

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

### Projektkoordinator:

Dipl.-Phys. Hendrik Wulfmeier,  
M.Sc. Alexander Omelcenko

**E-Mail:** hendrik.wulfmeier@efzn.de,  
alexander.omelcenko@efzn.de

**Internet:** www.spp1473.kit.edu/



Holger Fritze

Hendrik Wulfmeier

## Bisherige Forschungstätigkeiten

### Dünnschicht-Kalorimetrie basierend auf hochtemperaturstabilen piezoelektrischen Langasit-Einkristallen:

Ein Hauptaspekt der bisherigen Forschungstätigkeit lag auf dem Aufbau und der Etablierung des neu entwickelten Messverfahrens „Dünnschicht-Kalorimetrie“. Hierbei wird das kalorimetrisch zu untersuchende Material als dünne Schicht auf einen piezoelektrischen Resonator (Volumenschwinger) aufgebracht und dieser im Bereich seiner Resonanzfrequenz angeregt. Wenn keine Phasenumwandlungen vorliegen, folgt die Temperatur des mit dem Aktivmaterial beschichteten Resonators der Temperatur des Ofens, so dass mittels eines Hochgeschwindigkeits-Netzwerkanalytators kontinuierliche Frequenzänderungen detektiert werden.

Ein ungestörter Resonator aus dem hier verwendeten Langasit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) zeigt bei kontinuierlicher Temperaturerhöhung einen kontinuierlichen Abfall seiner Resonanzfrequenz. Bei Bedeckung mit einem Aktivmaterial wird nun während dessen endothermer Phasenumwandlung die vom Heizofen zugeführte thermische Energie nicht zum Erwärmen des Systems, bestehend aus Resonator und Aktivmaterial, verwandt, sondern zum Aufbringen der erforderlichen Enthalpie; die Probe ändert somit die Temperatur während der Phasenumwandlung trotz steigender Umgebungstemperatur nur geringfügig, was sich in einem Plateau im Resonanzfrequenz-Zeit-Diagramm manifestiert (vergleiche Abbildung 1). Vergleichbares gilt für exotherme Phasenumwandlungen. Hier wird bei der Temperatur der Phasenumwandlung spontan eine zusätzliche Wärmemenge frei. Diese überträgt sich auf den Resonator und resultiert folglich in einem Sprung im Resonanzfrequenz-Zeit-Diagramm (vergleiche Abbildung 1). Eine Umrechnung dieses Frequenzsprunges in die hierfür erforderliche zugeführte thermische Energie, lässt somit eine indirekte Messung der Phasenumwandlungsenthalpien zu.

Da das Einsatzgebiet dieses Dünnschicht-Kalorimeters im Bereich der Untersuchung von Batterie-

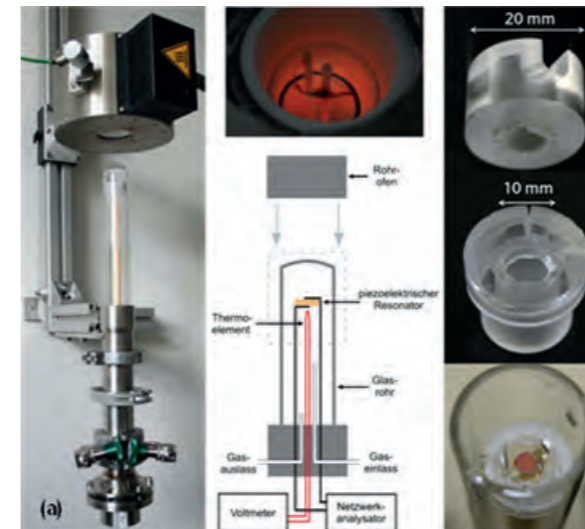


Abbildung 2: (a) Foto des Dünnschicht-Kalorimeters mit Rohrofen (links); Resonator im Dünnschicht-Kalorimeter während einer Messung bei 800°C (Mitte oben); Skizze des Aufbaus (Mitte unten); Fotos des Quarzglas-Probenhalters gefertigt mittels Ultra-schallfräse (rechts oben); Mit LMO beschichteter Resonator, eingesetzt in den Probenhalter (rechts unten) (b) Portable PLD-Kammer

materialien liegt, gilt es, bestimmte Nebenbedingungen zu beachten: Die im Rahmen des SPP zu untersuchenden Materialien zeigen im hohen Maße Reaktivität mit  $\text{CO}_2$  und Feuchtigkeit, die es für genaue Untersuchungen (insbesondere schnell durchreagierende dünne Schichten) zu unterbinden gilt. Um sicherzustellen, dass die komplette Behandlung der Proben von der Herstellung bis zum Abschluss der Messung ohne Bruch einer Inertgasatmosphäre durchgeführt werden kann, wurden eine portable Kammer für die PLD (Pulsed Laser Deposition, Laserablation), sowie ein Probenhalter für das Kalorimeter konstruiert, die es ermöglichen, dass dieses System in eine Handschuhbox eingeschleust werden kann (Abbildung 2); Kontaminationen der Proben durch atmosphärische Einflüsse sind somit weitgehend ausgeschlossen.

Getestet wurde das Messverfahren „Dünnschicht-Kalorimetrie“ zunächst mit diversen Materialien, deren kalorimetrische Eigenschaften bekannt sind, um so Referenzwerte zu erlangen. Da die gemessenen Enthalpien sehr gut mit Literaturwer-

ten übereinstimmen, ist die prinzipielle Funktionalität des im Zuge dieses Projektes aufgebauten Systems nachgewiesen und es kann für neue zu untersuchende Materialien angewendet werden.

### Projektpartner

#### Projektkoordination

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- Karlsruhe Institute of Technology

#### Beteiligte Institute

- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)

#### Externe Partner

- Technische Universität Ilmenau, Prof. Dr. rer. nat. Andreas Bund

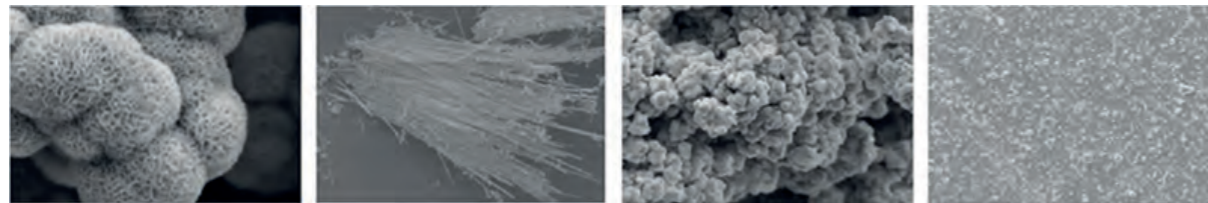


Abbildung 3: Molybdendisulfid (MoS<sub>2</sub>) als Nano-Blumen, -Röhrchen, -Flocken und PLD-Dünnschicht (v. l.)

**Molybdendisulfid (MoS<sub>2</sub>) als Anodenmaterial:** MoS<sub>2</sub> besitzt eine dem Graphit ähnliche Lagenstruktur mit Ebenen aus Molybdän-Atomen, geschichtet zwischen zwei Lagen aus Schwefel-Atomen, so dass es ein vielversprechendes Aktivmaterial für Li Ionen ist. Als Anode in Lithium-Ionen-Batterien weist MoS<sub>2</sub> eine theoretische Kapazität von über 1.100 mAh/g auf (zum Vergleich Graphit: 372 mAh/g). Neben dieser hohen vorhergesagten Kapazität macht die Variabilität der auftretenden Morphologien MoS<sub>2</sub> (je nach Syntheseroute kann es als Volumenmaterial, diverse nano-kristalline Pulvervarianten oder als Nanoröhrchen präpariert werden) zu einem aussichtsreichen Material, um den Einfluss von Größe und Form auf die elektrochemischen, kinetischen und thermodynamischen Eigenschaften zu untersuchen, ohne dabei die stö-

chiometrische Materialkomposition zu verändern. Im Zuge dieses Projektes wurden bereits verschiedenen Syntheserouten (Abbildung 3) für die Präparation von nanokristallinem MoS<sub>2</sub> realisiert und die hergestellten Proben charakterisiert (REM, XRD) und mittels Dünnschicht-Kalorimetrie thermodynamisch untersucht (Abbildung 4). Weiterhin wurden Zyklovoltammetrieexperimente (gegen metallisches Lithium) durchgeführt (Abbildung 5).

**Anwendungsbeispiel: Kathodenmaterial Lithium-Mangan-Oxid (LMO)**

Lithium-Mangan-Oxid ist ein vielversprechendes Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien. Obwohl es mehrere Phasen mit höherer theoretischer Kapazität gibt, zeigt sich der Spinell (LiM-

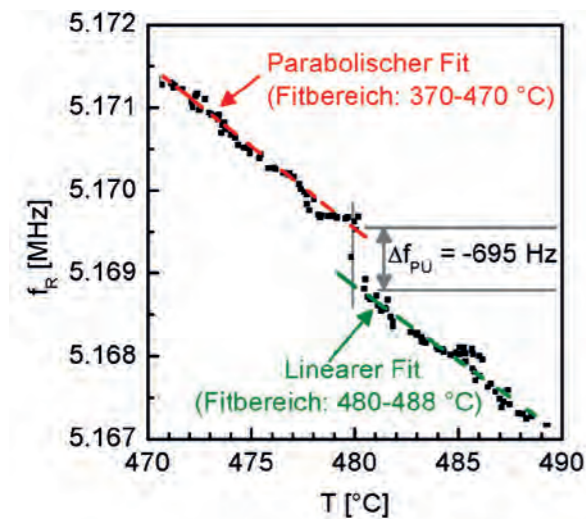


Abbildung 4: Kristallisation von amorphem MoS<sub>2</sub>, gemessen mittels Dünnschicht-Kalorimetrie

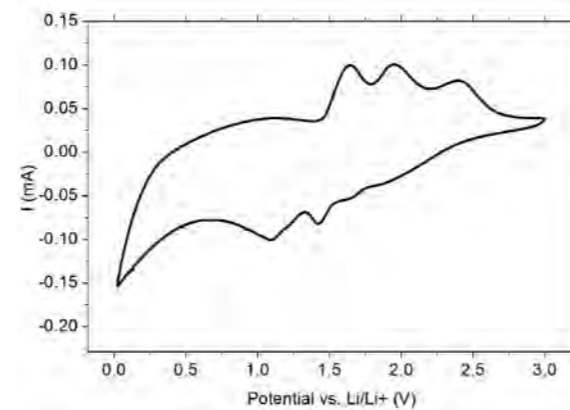


Abbildung 5: Zyklovoltammetrische Charakterisierung von Molybdendisulfid Nano-Blumenstruktur

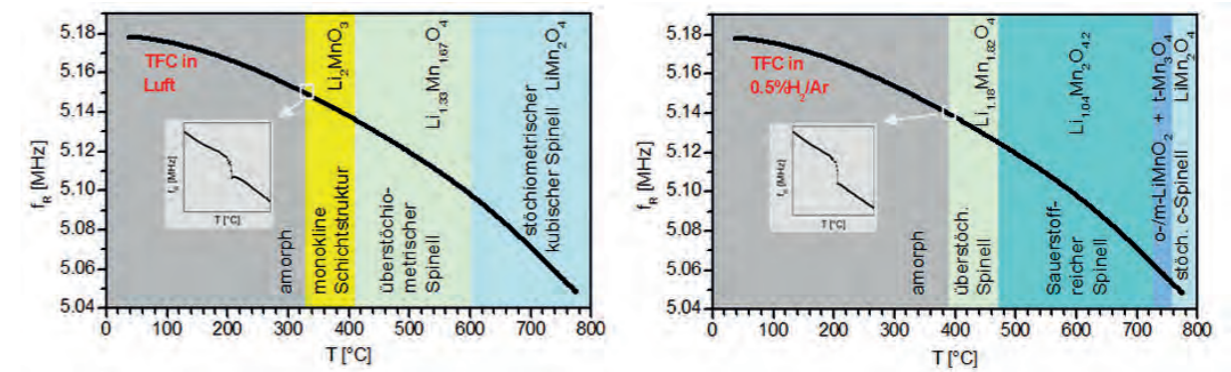


Abbildung 6: Temperaturverlauf der Resonanzfrequenz eines mit LMO beschichteten Resonators in Luft (links) und 0,5 % H<sub>2</sub>/Ar (rechts). Die Inlays zeigen Vergrößerungen der Frequenzsprünge in den Resonanzfrequenz-Temperatur-Messkurven an den jeweils ersten Phasenübergängen (Jeweils ein Beispiel).

n<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Kapazität von 100-150 Wh/kg) als die technologisch vielversprechendste stöchiometrische Variante auf Grund seiner hohen strukturellen Stabilität; diese bedingt eine hohe Zyklen- und Lebenszeitstabilität der Kathode. Das thermische Verhalten von LMO-Dünnschichten in Umgebungsluft und bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck (pO<sub>2</sub>) in 0,5 % H<sub>2</sub>/Ar wurde mit dem Dünnschicht-Kalorimeter von Raumtemperatur bis in den Hochtemperaturbereich (circa 800 °C) untersucht (Abbildung 6). Während in Luft drei Phasenumwandlungen auftreten (bei 330 °C, 410 °C, 600 °C), kann man in 0,5 % H<sub>2</sub>/Ar vier Phasenumwandlungen beobachten (bei 389 °C, 471 °C, 730 °C, 758 °C). Die dazugehörigen Umwandlungsenthalpien wurden ermittelt und die kristallographischen Phasen mittels Röntgen-Diffraktometrie und Raman-Spektroskopie identifiziert. Je nach Atmosphäre bildet sich die spinellartige LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-Phase bei unterschiedlichen Temperaturen aus, in Luft deutlich früher als in 0,5 % H<sub>2</sub>/Ar. Auffällig ist, dass sich die monokline Schichtstruktur Li<sub>2</sub>MnO<sub>3</sub> lediglich unter Umgebungsluft ausbildet. In 0,5 % H<sub>2</sub>/Ar hingegen tritt keine nicht-spinellartige Übergangsphase auf; stattdessen erfolgt ein direkter Übergang vom amorphen Zustand in eine Spinell-Grundstruktur.

Diese Untersuchungen ermöglichen einen Einblick in die Atmosphärenabhängigkeit der Materi-

alstruktur und unterstützen die Optimierung der Materialsynthese.

**Aufbau eines erweiterten Dünnschicht-Kalorimeters:**

Nach der Etablierung der Funktionalität des Messverfahrens „Dünnschicht-Kalorimetrie“ wurde im Zuge der Verlängerung des Projektes ein zweites Dünnschicht-Kalorimeter aufgebaut (Abbildung 7). Die Erweiterungen und Verbesserungen basieren auf den Erfahrungen mit dem ersten System und ermöglichen es, die Messkapazität zu erhöhen sowie systematische Untersuchungen an Materialien der Projektpartner aus dem SPP durchzuführen. Zu den Erweiterungen gehört eine verbesserte Ofenregelung, die mit einem Gleichstromnetzteil betrieben wird. Dadurch werden elektromagnetische Störfelder minimiert, die sich negativ auf die Qualität der Daten auswirken. Außerdem wurde die Temperaturregelung verbessert, so dass nur noch sehr niedrige Schwankungen von ±0,1K auftreten.

Des Weiteren wurde das zweite Dünnschicht-Kalorimeter mit einem größeren Probenhalter ausgerüstet (Abbildung 8), in dem sich zwei Proben gleichzeitig vermessen lassen. Dies ermöglicht zum Beispiel Messungen von zwei Aktivschichten unter gleichen Bedingungen, deren Komposition oder Dicke variiert werden kann. Weiter-



Abbildung 7: Zweites Dünnschicht-Kalorimeter

hin kann eine der Proben als Referenz dienen. Um das Messverfahren zu optimieren, werden mit einer Ultraschallfräse „freistehende Resonatoren“ hergestellt, deren schwingender Bereich vom Rest des Resonators thermisch und mechanisch entkoppelt ist (Abbildung 9). Damit wird

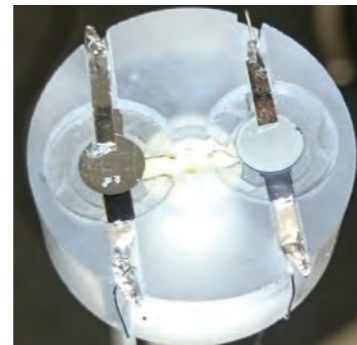


Abbildung 8: Probenhalter mit zwei Resonatoren



Abbildung 9: Freischwinger, thermisch und mechanisch entkoppelter Resonator

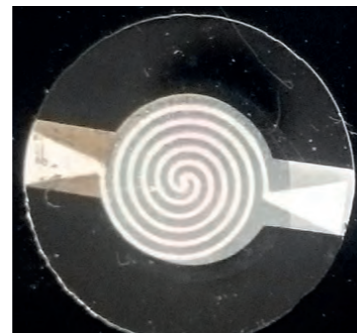


Abbildung 10: Resonator mit Pt Heizstruktur

eine deutliche Verbesserung der Empfindlichkeit der kalorimetrischen Messungen erreicht. In diesem Zusammenhang wird das Resonanzverhalten der Resonatoren unter Zugabe von definierten Energiemengen untersucht. Hierfür werden zunächst die mittels PLD aufgebrachten Elektroden

mit einer Dünnschicht Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) elektrisch isoliert, so dass dann mittels Siebdruck spiralförmige Platin-Heizstrukturen aufgebracht werden können. Bei Temperaturen, an denen Phasenumwandlungen beobachtet werden, werden definierte Spannungs-Pulse an diese Strukturen angelegt, um Wärmemengen und damit Frequenzsprünge, die durch Aktivschichten ausgelöst werden, zu simulieren (Abbildung 10).

#### Kalorimetrische Charakterisierung der Langasit-Kristalle mittels STA

Da für die Auswertung der Messdaten möglichst genaue Kenntnisse zum thermischen Verhalten der piezo-elektrischen Resonatoren erforderlich sind, wird das Temperaturverhalten der Langasit-Einkristalle mittels STA (Simultane Thermische Analyse) charakterisiert. Hierbei werden die Messmethoden Thermogravimetrische Analyse (TGA) und Dynamische Differenzkalorimetrie (DDK; engl.: Dynamic Scanning Calorimetry, DSC) simultan angewendet. Bei der TGA wird die Massenänderung einer Probe in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit gemessen; die DDK ist ein Verfahren, das zur kalorimetrischen Analyse von abgegebener oder aufgenommener Wärmemenge einer Probe beim Aufheizen und Abkühlen dient. Mittels dieser Messmethode wurde der Temperaturverlauf der spezifischen Wärmekapazität der Langasit-Einkristalle im Bereich von 40 bis 1.000 Grad Celsius bestimmt. Die genaue Kenntnis dieser Daten ist essentiell für eine genaue Auswertung der Dünnschicht-Kalorimetrie-Messungen.

#### Zugehörige Publikationen

Thin Film Calorimetry – Device Development and Application to Lithium Ion Battery Materials  
Hendrik Wulfmeier, Daniel Albrecht, Svetlozar Ivanov, Julian Fischer, Rolf Grieseler, Peter Schaaf, Sven Ulrich, Andreas Bund, Holger Fritze  
Materials Research Society Symposium Proceedings Vol. 1496 (2013); DOI: 10.1557/opl.2013.104

Synthesis of Different Molybdenum Disulfide Nanostructures and their Applicability in Lithium Ion Batteries with Ionic Liquid Electrolytes

Daniel Albrecht, Hendrik Wulfmeier, Svetlozar Ivanov, Andreas Bund, Holger Fritze  
Materials Research Society Symposium Proceedings Vol. 1496 (2013); DOI: 10.1557/opl.2013.126

High-temperature thin-film calorimetry: a newly developed method applied to lithium ion battery materials

Hendrik Wulfmeier, Daniel Albrecht, Svetlozar Ivanov, Julian Fischer, Sven Ulrich, Andreas Bund, Holger Fritze

Journal of Material Science 48 [19], 6585-6596 (2013); DOI 10.1007/s10853-013-7455-x

Electrochemical Performance of Ionic Liquid - Molybdenum Disulfide Li-Ion Batteries

Daniel Albrecht, Hendrik Wulfmeier, Svetlozar Ivanov, Andreas Bund, Holger Fritze

Journal of Applied Electrochemistry 43 (2013) 559-565; DOI 10.1007/s10800-013-0548-z

Messsystem zur Bestimmung thermodynamischer Eigenschaften dünner Schichten bei hohen Temperaturen

Hendrik Wulfmeier, Daniel Albrecht, Holger Fritze, Svetlozar Ivanov, Andreas Bund

Proceedings 11. Dresdner Sensor Symposium, Dresden/Germany, 2013-12-09 – 2013-12-11 (2013), 34-39; DOI: 10.5162/11dss2013/2.2;

ISBN: 978-3-9813484-5-3

Thin-Film Calorimetry: Analytical Tool for In-Situ Characterization of Lithium Ion Batteries

Hendrik Wulfmeier, Daniel Albrecht, Julian Fischer, Svetlozar Ivanov, Andreas Bund, Sven Ulrich, Holger Fritze

Journal of the Electrochemical Society 162 [4]: A727-A736 (2015); DOI:10.1149/2.0741504jes

Dünnschichtkalorimetrie auf der Basis piezoelektrischer Langasit-Resonatoren: Einfluss der Schichtdicke auf die Bestimmung der Schmelzenthalpie von Zinn-Schichten

Sebastian Schröder, Hendrik Wulfmeier, Holger Fritze

Tagungsband zur 49. Metallographie-Tagung Materialographie im Rahmen der DGM-Werkstoffwoche 2015

# ESPEN – Potentiale Elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen

## Teilvorhaben

Verringerung des Potentials elektrochemischer Speicher durch alternative und ergänzende Technologien und Systemlösungen.

## Projektziel

Ziel des Projekts ist die Entwicklung von Handlungsempfehlungen zum Einsatz von elektrochemischen Speichern und deren Weiterentwicklung, sodass diese das zukünftige Energieversorgungssystem optimal unterstützen können.

Im Rahmen des Verbundprojekts werden daher die Potentiale elektrochemischer Speicher in Bezug auf ihren Beitrag zur Wirtschaftlichkeit, Stabilität und Sicherheit der zukünftigen Stromversorgung in Deutschland untersucht. Weiterhin werden alternative Speichertechnologien, wie zum Beispiel Pumpwasser- oder Druckluftspeicher sowie stoffliche Speicher, und Systemlösungen, wie etwa Konzepte des Lastmanagements betrachtet, um Anwendungsbereiche zu identifizieren, in denen elektrochemische Speicher besonders geeignet sind.

## Stand der Technik

Zur Sicherstellung der Stabilität des elektrischen Energieversorgungssystems sind eingespeiste und entnommene Energie stets – unter anderem durch den Einsatz von Regelleistung – im Gleichgewicht halten. Bisher erfolgt die Bereitstellung der Regelleistung vornehmlich durch thermische Kraftwerke, die zum Beispiel mit Kohle oder Erdgas befeuert werden. Bei diesen Kraftwerken verursachen die nötigen technischen Besonderheiten für schnelle Änderungen der abgegebenen

Leistung eine Erhöhung der Investitions- und Betriebskosten bei gleichzeitiger Verringerung des Wirkungsgrades.

Im heutigen elektrischen Energieversorgungssystem sind zwei Arten von Energiespeichern vorhanden. Zum einen ist Energie in den rotierenden Massen der Generatoren- und Turbinensätze der großen Kraftwerke gespeichert, die bei Frequenzänderung kurzfristig Energie mit hoher Leistung aufnehmen beziehungsweise abgeben. Somit tragen die Generatoren der großen thermischen Kraftwerke, wie zum Beispiel Kern- und Braunkohlekraftwerke, entscheidend zur Stabilisierung des elektrischen Systems bei. Da sich die Anzahl der am Netz befindlichen Großgeneratoren im Zuge der Energiewende verringern wird und diese zunehmend durch kleinere Erzeugungseinheiten auf Basis regenerativer Energien ersetzt werden, wird sich auch ihre frequenzstabilisierende Wirkung reduzieren, sodass Alternativen gefunden werden müssen (vergleiche [1]).

Bei der zweiten Art vorhandener Energiespeicher handelt es sich um Pumpwasser- und Druckluftspeicherwerke, die als Spitzenlastkraftwerke bei hohem Bedarf für kurze Zeit eine hohe Leistung abgeben können, sofern der Speicher geladen ist. Während Schwachlastzeiten – Zeiten geringen Leistungsbezugs und damit einhergehenden geringen Energiekosten – werden diese Speicher geladen. Speicherwerke werden zum Ausgleich der eingespeisten und der bezogenen Leistung, also zur Erbringung von negativer und positiver Regelleistung, eingesetzt.

Weitere Energiespeicher sind im elektrischen Energieversorgungssystem derzeit nicht vorhanden

und werden aufgrund der vorhandenen, recht flexiblen Kraftwerkskapazität und der Übertragungskapazität des elektrischen Netzes momentan nicht benötigt. Ist die Kapazitätsgrenze des elektrischen Netzes durch starken, lokalen Zubau von Anlagen zur Nutzung regenerativer Energiequellen erreicht, werden die Netze durch den Zubau neuer beziehungsweise die Verstärkung bestehender Übertragungs- und Verteilnetzes ausgebaut (vergleiche [2]).

## Lösungsweg

### Verbundprojekt

Im Einzelnen werden die nachfolgend aufgeführten Punkte im Rahmen des Verbundprojekts bearbeitet.

1. Erstellung von Referenznetzen zur Betrachtung verschiedener Szenarien mit großen zentralen Erzeugungseinheiten beziehungsweise mit ausschließlich dezentraler und größtenteils regenerativer Erzeugung.

2. Definition von Anwendungsszenarien für Speicher und Ermittlung der technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an Speicher im Netz
3. Betrachtung von alternativen Lösungen zum Einsatz von Energiespeichern, wie zum Beispiel des Ausbaus der elektrischen Netze, des Lastmanagements, des Einsatzes von Spitzenlastkraftwerken mit kurzer Reaktionszeit oder des Einsatzes von Zusatzlasten
4. Untersuchungen an elektrochemischen Speichern bezüglich des Wirkungsgrades, der Reaktionszeit, der Dynamik und der Lebensdauererwartungen beim zu erwartenden Lastkollektiv
5. Möglichkeit der Nutzung von Energiespeichern, die primär für andere Anwendungen vorgesehen sind, wie zum Beispiel in USV-Anlagen und Elektrofahrzeugen
6. Berechnung von Lebenszykluskosten von Energiespeichersystemen in den ermittelten Belastungsfällen
7. Untersuchung der Potentiale von Energiespeichern, die in Abhängigkeit der Netzgrö-



Das EFZN veranstaltete erstmalig 2015 die Dialogplattform Power-to-Heat.

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

ESPEN – Potentiale Elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

0325530 A

### Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2012 bis 31.12.2015

### Berichtszeitraum:

01.11.2012 bis 31.12.2015

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Projektkoordinator:

Prof. Dr. rer. nat. Heinz Wenzl,  
Dipl.-Ing. Verena Spielmann

E-Mail: verena.spielmann@tu-clausthal.de



Heinz Wenzl



Verena Spielmann

- ßen Spannung und Frequenz zur Netzstabilisierung eingesetzt werden, und Entwicklung entsprechender Regelkonzepte
8. Betrachtung von Kommunikationssystemen und Bewertung der dadurch entstehenden Vorteile in Bezug auf die zu erwartenden Zusatzkosten
  9. Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von Speicherkapazitäten und Erarbeitung von Änderungsvorschlägen dieser Rahmendbedingungen für den Betrieb von kleinen, dezentralen Speicheranlagen
  10. Bewertung von Akzeptanzproblemen und möglichen Auswirkungen von dezentralen Speichersystemen

Im Fokus des Verbundprojekts steht die Untersuchung der Eignung verschiedener Speichertechnologien in unterschiedlichen Anwendungsgebieten. Vor diesem Hintergrund wurden aus den durchgeführten Netzsimulationen Anforderungsprofile an (elektrochemische Speicher) in den folgenden Anwendungsbereichen ermittelt:

- Spannungshaltung durch Reduzierung der (lokalen) Einspeisespitze
- Unterstützung bei oder Übernahme der Erbringung von Regelleistung
- Vermeidung von Netzengpässen
- Glättung des Residuallastverlaufs

Aus den ermittelten Anforderung (Leistung, Kapazität, Belastung) wurden im Rahmen einer wirtschaftlichen Betrachtung unter Berücksichtigung von Alterungseffekten der jeweils betrachteten Speichertechnologie, die jeweils beste Speicheranwendungsbereiche bestimmt. Ergebnisse der ebenfalls im Rahmen des Projekt durchgeführten experimentellen Speicheruntersuchung werden in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen berücksichtigt. Erste Projektergebnisse sind in die VDE-Studie „Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene“ [3] eingeflossen.

Da neben den technischen Aspekte des Speichereinsatzes ebenfalls rechtliche Aspekte und Fragestellungen der Akzeptanz für den Einsatz von elektrochemischen Speichern relevant sind,

wurden weiterhin die rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Speichern analysiert und erste Anpassungsvorschläge erarbeitet, die die Einsatzmöglichkeiten von Speichern im Energiesystem verbessern können. Außerdem wurden ökologische Auswirkungen und die Akzeptanzproblematik untersucht, um nicht-technische Hemmnisse der Speichernutzung in den untersuchten Anwendungsfällen zu identifizieren.

### Arbeiten am Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme

**Betrachtung alternativer Technologien:** Die Kernaufgabe des am Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme durchgeführten Teilvorhabens bezieht sich auf die Betrachtung alternativer Lösungen zur Integration regenerativer Energie in das Energiesystem. Damit werden folgende Alternativen zu Einsatz elektrochemischer Speicher betrachtet, die das Potential dieser in bestimmten Anwendungsfällen reduzieren können.

- Nutzung von Gas- und Wärmenetzen (Power-to-Heat und Power-to-Gas)
- Spitzenlastkraftwerke
- Ausbau der elektrischen Netze
- Lastmanagement
- Zusatzlasten

Ziel ist die Beschreibung möglicher Alternativen, ihrer Kosten und Auswirkungen auf die Netzqualität, Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Versorgung, sowie deren Auswirkungen auf andere gesellschaftliche und volkswirtschaftliche Aspekte. Im Fokus dieses Arbeitsschrittes steht dabei nicht die genaue Untersuchung dieser Lösungsalternativen, sondern die Identifizierung von Bereichen, in denen elektrochemische Speicher besonders gute Chancen haben werden, und Bereichen, in denen alternative Lösungen besondere Vorteile haben können. Auch Kombinationen der genannten Alternativen mit Speichertechnologien sollen betrachtet werden.

Während der Projektlaufzeit hat sich gezeigt, dass insbesondere die Nutzung von Wärmenetzen durch die Anwendung des Power-to-Heat-(P2H)-

Konzepts eine interessante Alternative zum Einsatz elektrochemischer Speicher, sowohl für die lokale Aufnahme von Einspeisespitzen im Niederspannungsnetz, als auch für die Nutzung regional vorhandener Energieüberschüsse, die andernfalls durch Einspeisemanagementeingriffe abgeregelt werden würden (vergleiche [4]).

Im Rahmen der beispielhaften Untersuchung eines Niederspannungsnetzes wurden folgende Möglichkeiten zu Einhaltung der Spannungsgrenzen bei unterschiedlicher PV-Durchdringung verglichen:

- Einsatz von P2H in den Haushalten zur Aufnahme überschüssiger Energie

### Projektpartner

#### Projektkoordination

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal

#### Forschungsstellen

- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg
- Fraunhofer-Institut für Windenergie- und Energiesystemtechnik (IWES) in Kassel
- Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW); Fachgebiet Elektrochemische Akkumulatoren (ECA) in Ulm
- TU München (TUM); Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik (EES)
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen); Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik
- Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OvGU); Lehrstuhl Elektrische Netze und Alternative Elektroenergiequellen (LENA)

- Einsatz von PV-Hausspeichern zur Steigerung des Eigenverbrauchs
- Einsatz eines zentralen elektrochemischen Speichers am Strangende
- Kombination eines zentralen Speichers mit dem Einsatz von P2H in den Haushalten

Die Betrachtungen zeigen, dass der Betrieb der dezentralen Speicher (1 kWh Speicherkapazität pro 1 kWp der installierten PV-Anlage) mit dem Ziel der Maximierung des Eigenverbrauchs erwartungsgemäß einen geringen Effekt auf die Spannungserhöhung im Netz haben, da die Speicher zum Zeitpunkt der Spitzeneinspeisung meist bereits geladen sind. Gleichmaßen zeigt auch der am Strangende installierte zentrale Batteriespeicher mit einer Kapazität von 240 kWh (in Anlehnung an das Pilotprojekt der Stadtwerke Neustadt und IBC Solar in der Gemeinde Fechheim) einen geringen Einfluss auf die Spannungserhöhung, da die Speicherkapazität mit steigender installierter PV-Leistung nicht ausreicht.

Obwohl sich der signifikante Wärmebedarf der Haushalte auf die Wintermonate konzentriert (Ermittlung der Wärmebedarfszeitreihen nach [5] und [6]), führt die Nutzung des P2H-Konzepts durch den Vergleich mit dem Bedarf an elektrischer Leistung relativ hohen und kontinuierlichen Bedarf an thermischer Energie auch in den Sommermonaten noch zu einer wesentlichen Verringerung der Höhe und Anzahl der einspeisebedingten Spannungsbandverletzungen. In Bezug auf die Reduktion der Anzahl und Dauer der Überspannungseignisse (Überschreitung der Nennspannung um mehr als 10 Prozent bei einer Eingangsspannung von 107 Prozent der Nennspannung am MS/NS-Trafo) stellt sich die Kombination aus dezentraler Nutzung von P2H-Systemen in Kombination mit einem zentralen elektrischen Speicher als technisch vorteilhafteste Lösung dar.

Die Untersuchung wurde während der P2H-Dialogplattform des EFZN im Mai 2015 in Goslar vorgestellt und im Tagungsband veröffentlicht [7].

Neben Auswirkungen des Einsatzes dezentraler P2H-Anlagen auf das Verteilnetz, wird ebenfalls

der Einsatz eines zentralen Systems zur Aufnahme ansonsten abgeregelter Energie durch eine P2H-Anlage innerhalb eines Fernwärmenetzes untersucht [8].

Anhand eines beispielhaft betrachteten Fernwärmenetzes (basierend auf Angaben eines Stadtwerks), welches 434 Gebäude (vorwiegend Mehrfamilienhäuser) mit Wärme versorgt, wurden die Möglichkeiten der Installation eines elektrischen Heizsystems (5 MW) zur Aufnahme von regionalen Überschüssen (an einem fiktiven Markt), zur Teilnahme am Sekundärregel- und Minutenreservenmarkt, sowie zur Vermarktung an der EEX (Day-Ahead- und Intraday-Markt) untersucht. Im System ist ein Wärmespeicher mit einer Kapazität von 16 MWh vorhanden. Die Wärmebereitstellung erfolgt mittels eines Biomasse-Heizkraftwerks mit einer thermischen Leistung von 17 MW. Für die Spitzenlastbringung sowie zur Redundanz sind weiterhin Erdgaskessel im System vorhanden.

Für die Ermittlung der in der Region abgeregelten Energie wird auf die öffentlich verfügbaren Daten des lokalen Verteilnetzbetreibers zurückgegriffen und aus den Angaben zu den Einsparmaßnahmen, die Zeitreihe der abgeregelten Leistung abgeschätzt. Für die Umlagenbelastung des bezogenen Stroms werden einerseits die aktuell geltenden Rahmenbedingungen untersucht und andererseits eine nach [4] vorgeschlagene Reduzierung der EEG-Umlage und damit einhergehende verringerte Grenzkosten beziehungsweise gebotene Arbeitspreise betrachtet.

Es zeigt sich, dass der vorhandene Speicher mit einer Kapazität von 16 MWh für die Vermarktung an den Regelleistungsmärkten ausreichend ist. Unter den angenommenen Rahmenbedingungen können 20 Prozent der anderenfalls abgeregelten Energie zur Wärmebereitstellung eingesetzt werden.

Ergebnis der Analyse ist, dass die Nutzung der abgeregelten Energie in der Beispielregion in Mecklenburg-Vorpommern durch eine Power-to-Heat-Anlage im betrachteten Wärmenetz möglich, die Wirtschaftlichkeit der Anlage jedoch nur dann ge-

geben ist, wenn die Energie am regionalen Überschussmarkt mit 0 ct/kWh und ohne Umlagenbelastung gehandelt werden kann.

**Dissemination der Ergebnisse:** Im Rahmen des Projekts wurden offene Workshops zu den verschiedenen Themenstellungen durch das Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme organisiert und durchgeführt. Die erarbeiteten Ergebnisse werden mit Industrieunternehmen, insbesondere Energieversorgern und Netzbetreibern und der Politik diskutiert, um die Umsetzung der Handlungsvorschläge voranzubringen.

Seit Beginn des Projekts wurden Workshops unter reger Beteiligung von Interessenten aus Industrie und Forschung zu folgenden Themenstellungen durchgeführt:

- Pumpspeicherkraftwerke (Februar 2013 in Goslar)
- Große Batteriespeicher zur Netzstützung (April 2013 in Frankfurt am Main)
- Spannungshaltung (Mai 2013 in Magdeburg)
- Power-to-heat – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und der Firma Stiebel Eltron (Oktober 2013 in Holzminden)
- Power-to-Gas (November 2013 in München)
- Netzausbau (März 2014 in Magdeburg)
- Große Batteriespeicher – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und der Firma Power Innovation (Mai 2014 in Achim)
- Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen (Mai 2014 in Aachen)
- Nachhaltige Versorgungssicherheit – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und enercity (November 2015 in Hannover)
- USV- und Notstromanlagen – mit der Landesinitiative Energiespeicher und Systeme und der Firma Piller (März 2015 in Osterode am Harz)

#### Stand des Projekts

Die Kernpunkte des Projekts sind bereits abgeschlossen. Die Ausarbeitungen für den gemeinsamen inhaltlichen Abschlussberichts stehen noch aus.

#### Literatur

- [1] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030 – Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, Berlin, 2014.
- [2] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Verteilnetzstudie – Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030, Berlin, 2012.
- [3] VDE (Hrsg.): Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene – Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze, Frankfurt am Main, 2015
- [4] Agora Energiewende (Hrsg.): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Berlin, 2014.
- [5] Hellwig, M.: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. München, Technische Universität, Dissertation, 2003.
- [6] Bundesumweltministerium (Hrsg.): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Berlin, 2012.
- [7] Armbrrecht, B.; Schütte, T.; Spielmann, V. Anwendung von P2H zur Begrenzung der PV-Einspeiseleistung um Netzausbaumaßnahmen im Niederspannungsnetz zu vermeiden. In: Wenzl, H.; Kaiser, F. (Hrsg.): Erneuerbare erfolgreich integrieren durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN Goslar, 5. und 6. Mai 2015. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 2015. S. 39 – 51
- [8] Bettinger, C.; Spielmann, V. Regenerativer Überschussstrom für Power-to-Heat - Abschätzung der Potentiale von Überschussstrommärkten. In: Wenzl, H.; Kaiser, F. (Hrsg.): Erneuerbare erfolgreich integrieren durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN Goslar, 5. und 6. Mai 2015. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier Verlag Göttingen, 2015. S. 158 – 169

# Alterungsmodelle für Lithium-Ionen-Batterien am Beispiel von Elektrofahrzeugen

## Problem

Im Rahmen des Vorhabens ist zu untersuchen, wie sich die Alterung von Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen entwickelt, wenn zusätzlich Netzdienstleistungen (mit großen dynamischen Anforderungen aber kleinem Energiedurchsatz) zu erbringen sind (Vehicle-To-Grid). In der Literatur wurde das Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien zwar schon vielfach untersucht, meist jedoch nur bezüglich einzelner Alterungsursachen. Die komplexe Kombination von Alterungsprozessen als Ergebnis variabler Betriebsbedingungen und Lastkollektiven ist weitestgehend nicht bekannt. Um Lebensdauerprognosen für reale Anwendungen durchführen zu können, müssen die komplexen Wechselwirkungen aller Alterungsprozesse in Abhängigkeit von den

Betriebsbedingungen und die Gesamtwirkung auf lebensdauerrelevante Eigenschaften bekannt sein. Untersuchungen, die diesem Anspruch genügen und Hilfen für eine beschleunigte Entwicklung und verbesserte Betriebsstrategien bieten, existieren jedoch nicht.

## Ziel

Ziele des Projektes sind die Entwicklung unterschiedlicher Lebensdauerprognosemodelle, die zur Sicherstellung konsistenter Ergebnisse gegenseitig überprüft werden, die experimentelle Überprüfung üblicher Annahmen bei Lebensdauerprognosen (Additivität des Lebensdauerverlustes, Unabhängigkeit von der Reihenfolge, Gültigkeit des Arrheniusschen Gesetzes bei Kombinationen von Belastungen und komplexen Lastkollektiven) und die Anwendung auf die Nutzung von Batterien für Elektrofahrzeuge für netzstützende Maßnahmen.

Mit Abschluss des Forschungsvorhabens wird erwartet, dass das Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien, insbesondere bei komplexen und hochdynamischen Belastungen ohne besonderen Ladungsumsatz, exakter beschrieben werden kann als dieses bisher der Fall ist. Dazu gehören die aufgeschlüsselte Darstellung der Einflussfaktoren für die Alterungsmechanismen in Form der entsprechenden Modellstrukturen und die zuverlässige Lebensdauerprognose von Lithium-Ionen-Batterien unter beliebigen Betriebsbedingungen bei Berücksichtigung der Wechselwirkungen verschiedener Alterungsmechanismen. Mit Kenntnis der wesentlichen Alterungsursachen erfolgt ein modellbasierter Entwurf einer optimierten Betriebsführung einer Lithium-Ionen-Batterie unter Minimierung der Speicherbelastung und Maximierung der netzstabilisierenden Maßnahmen.

## Projektpartner

### Projektkoordination

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

### Forschungsstellen

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- TU Clausthal



Bild 1: Vorgehen im Projekt

Des Weiteren werden Aussagen zur Bewertung der Netzstabilisierung durch dezentrale Speicher unter Berücksichtigung des Hauptanwendungsfeldes Elektrofahrzeug möglich.

## Stand der Technik

Erste Ergebnisse, die die Alterung von Lithium-Batterien in Bezug zur Fahrzeuganwendung teilweise mit „Vehicle-To-Grid“ (V2G)-Funktionalität setzen, sind bekannt. Untersuchungen von Alterungsprozessen ohne die vollständige Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen und ihren Abhängigkeiten von den Betriebsbedingungen sind für eine Lebensdauerprognose grundsätzlich nicht ausreichend. Es ist unmittelbar klar, dass eine rein experimentelle Bestimmung der zu erwartenden Lebensdauer wegen der Vielfalt der Alterungsmechanismen und vor allem der Variationsbreite der Betriebsbedingungen Langzeittests mit vielen Prüflingen erfordern und einen

sehr hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verursachen würde. Es müssen deshalb modellgestützte Ansätze verwendet werden, mit denen die Komplexität beherrschbar wird. Die in diesem Projekt vorgeschlagene Verknüpfung von drei unterschiedlichen Lebensdauerprognosemodellen geht über die bisher veröffentlichten Ansätze hinaus.

## Lösungsweg

Nach erfolgter Bestimmung relevanter Lastprofile werden Lebensdauerexperimente und weitere für die Parametrierung und Verifikation der Alterungsmodelle notwendige Versuche durchgeführt. Für die Modellierung der Alterung werden drei Modellansätze parallel entworfen. Neben einem physikalisch-chemischen Modell werden ein gewichtetes Amperestundenmodell und ein ereignisbasiertes Lebensdauermodell entwickelt. Je nach erreichbarer Genauigkeit und Gültigkeit der verschiedenen Modellansätze werden diese entweder einzeln verwendet oder auch in Kombination genutzt.

Anhand der entwickelten Alterungsmodelle können die Belastungsprofile hinsichtlich ihrer Veränderungen des Alterungsgradienten analysiert werden. Daraus wird modellbasiert eine innovative Lade-/Entladestrategie ermittelt, sodass eine optimale Speicherauslastung bei minimierter Alterung der Lithium-Ionen-Batterie gewährleistet wird. Der Algorithmus soll den frühzeitigen Kapazitätsverlust der Batterie verhindern und die Lebensdauer bei gleichzeitiger Nutzung der Batterie für Netzdienstleistung erhöhen.

Für den experimentellen Nachweis der zuvor gemachten Annahmen wird ein Lithium-Batteriespeichersystem mit VISMA (Virtuelle Synchronmaschine)-Wechselrichter im Labormaßstab aufgebaut und anschließend mit Hilfe von Belastungsszenarien, wie sie für den Einsatz einer Fahrzeugbatterie mit V2G-Funktionalität zu erwarten wären, getestet. Die Lade-/Entladestrategie für die Netzstützung ist auf die minimale Alterung der Batterie bei gleichzeitig möglichst optimaler Speicherausnutzung auszuliegen.



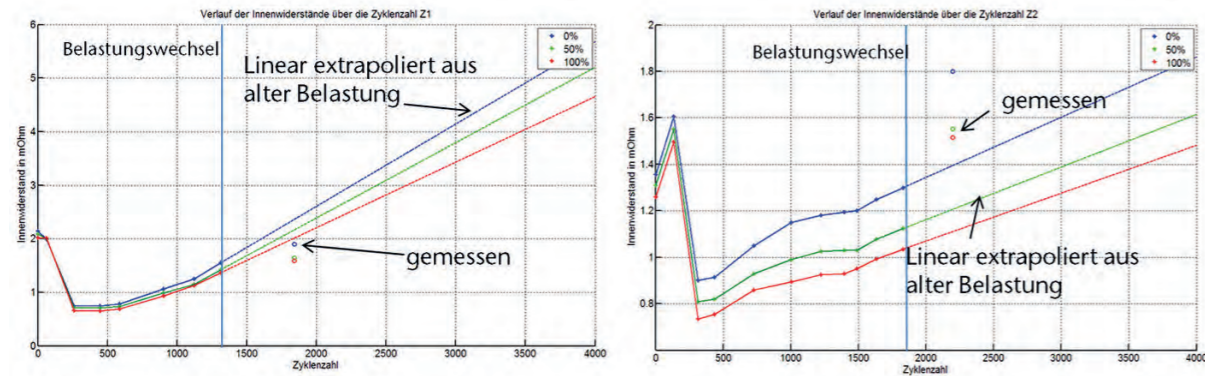


Bild 2: Verlauf des ohmschen Widerstands von zwei 40Ah NMC-Lithium-Ionen-Pouchzellen bei wechselnden Belastungsprofilen aufgetragen über die äquivalente Vollzyklenzahl. Zelle Z1 (links) wurde in einem Zyklus zunächst mit einem alternierenden Strom von 60A bzw. 100A (jeweils 5s, Mittelwert 80A) geladen und anschließend wieder komplett entladen, ab Zyklus 1300 dann bei einem Ladezustand von 80 % jeweils für 43s mit 100A ge- und entladen, Ladezustandshub 3 %. Zelle 2 (rechts) wurde in der anderen Reihenfolge belastet, d.h. erst jeweils mit 3 % Ladezustandshub ge- und entladen und anschließend ab Zyklus 1800 mit einem mittleren Strom von 80A geladen.

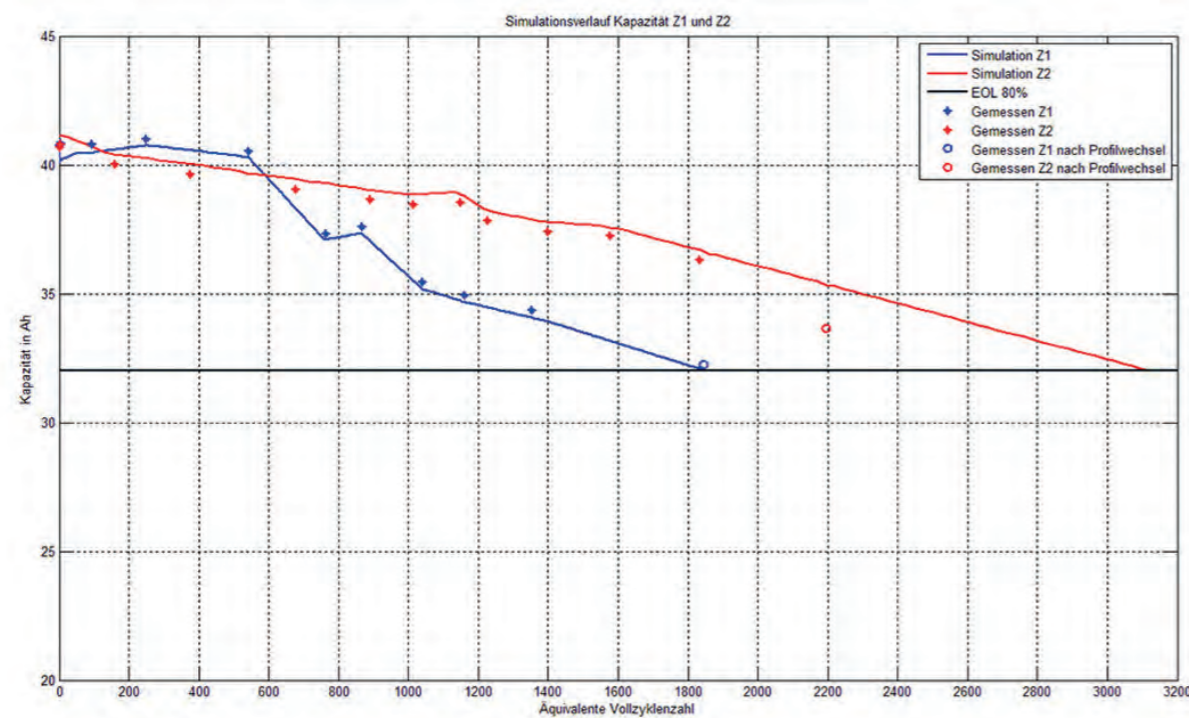


Bild 3: Verlauf der Kapazität bei zwei 40Ah Lithium-Ionen-Pouchzellen bei wechselnden Belastungsprofilen aufgetragen über die äquivalente Vollzyklenzahl.

Die Auswirkungen auf die Batterielebensdauer sowie auf die netzdienlichen Eigenschaften werden anschließend bewertet.

### Projektstand

Zu Beginn des Projektes wurden reale Belastungsdaten aufgenommen und mit einer aus der Betriebsfestigkeitslehre bekannten Lastkollektivanalyse ausgewertet.

Zur Bestimmung des Alterungsverhaltens werden Lithium-Ionen-Zellen sowohl zyklischer als auch kalendarischer Alterung bei verschiedenen Temperaturen unterworfen. Weiterhin werden zyklische Belastungsuntersuchungen mit wechselnden Belastungen durchgeführt und die Daten insbesondere bezüglich der Kapazitäts- und Widerstandsentwicklung ausgewertet und für die Parametrisierung eines ereignisbasierten sowie eines elektrochemischen Modells genutzt (siehe Bilder 2 und 3).

### Veröffentlichungen

- [1] Haubrock: Degradationsuntersuchungen von Lithium-Ionen Batterien bei deren Einsatz in Elektro- und Hybridfahrzeugen, Dissertation TU Clausthal, 2011, ISBN 978-3-86955-831-8
- [2] Tchoupo Lando, Bengler, Wenzl: Modell für die Lebensdauerprognose und Betriebsführung der Lithium-Batterie, 7. E-Motive Expertenforum Elektrische Fahrzeugantriebe, München 09.06.2015
- [3] Beushausen, Werther, Bengler: Untersuchung der Rückwirkung des hochdynamischen Wechselrichters der virtuellen Synchronmaschine zur Netzstabilisierung auf den Gleichspannungs-Zwischenkreis, 10. Silicon Saxony Day, Dresden 07.07.2015
- [4] Bengler, Wenzl, Beushausen, Beck: Virtual Inertia with high power batteries, für die 10. Int. Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien, Düsseldorf, März 2016
- [5] Bengler, Wenzl, Beushausen, Beck: Ageing of lithium ion batteries in high dynamic applications, für Kraftwerk Batterie, Münster, April 2016

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Alterungsmodelle für Lithium-Ionen-Batterien am Beispiel von Elektrofahrzeugen

**Fördernde Stelle:**  
Deutsche Forschungsgemeinschaft

**Förderkennzeichen:**  
Be 1496-17-1

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.07.2011 bis 30.06.2015

**Berichtszeitraum:**  
01.07.2011 bis 30.06.2015

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

**Projektkoordinator:**  
Dr.-Ing. Ralf Bengler

**Projektmitarbeiter:**  
Lennart Beushausen, M.Sc.

**E-Mail:** ralf.bengler@efzn.de



Ralf Bengler



Lennart Beushausen

# Smart Microgrids – Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte, 'intelligente' Versorgungs- und Verbrauchsnetze

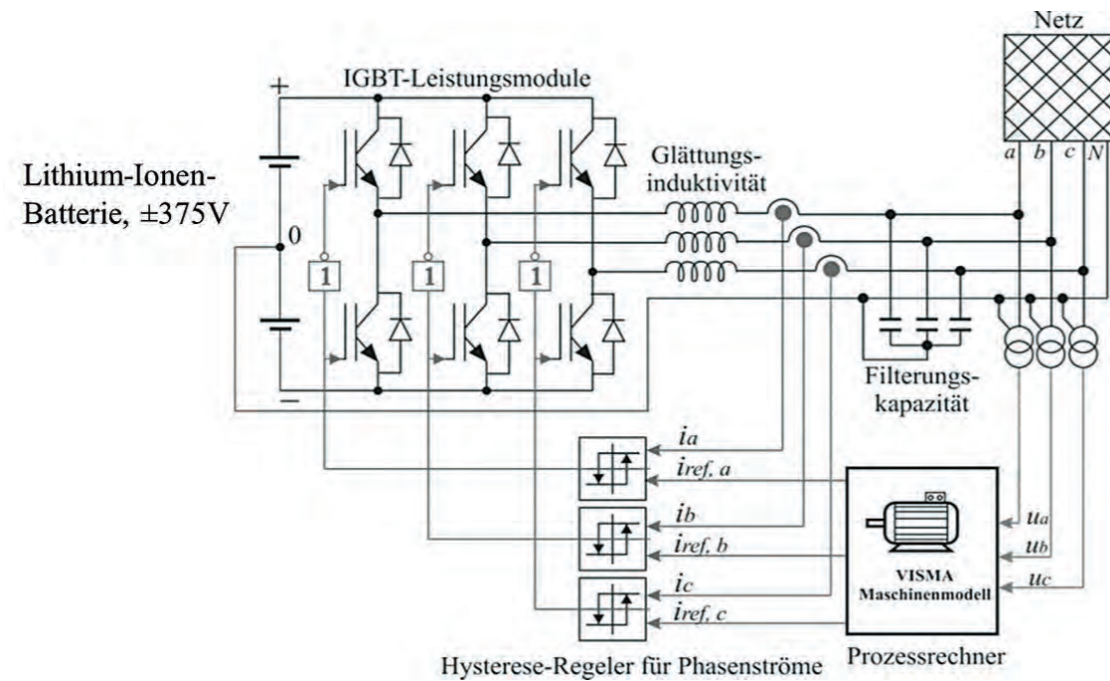


Bild 4: Aufbau zur Netzstützung bestehend aus Lithium-Ionen-Batterie, IGBT-Wechselrichter, VISMA Prozessrechner und Netzanschluss nach [Chen, Y.; Werther, B.; Schwake, B.; Beck, H.-P.: Netzstabilisierung durch die „Virtuelle Synchronmaschine“ (VISMA) mit überlagerter Frequenz- und Spannungsregelung, Internationaler ETG-Kongress 2013, Berlin 2013]

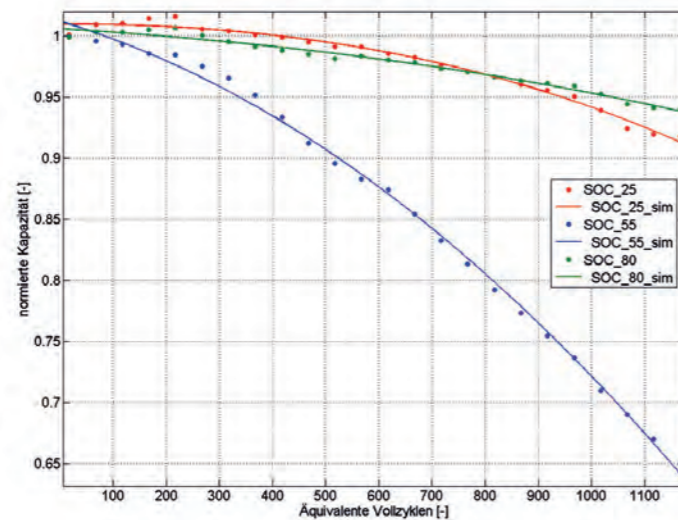


Bild 5: Gemessene (Punkte) und berechnete (Linie) normierte Kapazitätsverläufe über Zyklenzahl von 8 Ah LFP-Rundzellen belastet mit 2C bei 40 °C, Entladetiefe 10 %, mittlerer Ladezustand 55 % (blau), 25 % (rot), 85 % (grün).

## Projektziel

**Verbundprojekt:** Die im Projekt verfolgten übergeordneten Ziele betreffen die Erschließung regionaler Potenziale erneuerbarer Energien und deren dezentrale Nutzung durch die dynamische Anpassung von Angebot und Nachfrage. Einhergehend soll die Vulnerabilität des Energiesystems insgesamt reduziert und dessen Flexibilität hinsichtlich des Potenzials der Einbindung erneuerbarer Energiequellen erhöht werden. Unter Einbeziehung verschiedener Praxispartner in zwei Modellregionen wird die soziale Akzeptanz der Nutzung erneuerbarer Energien untersucht.

Im Fokus der im Projekt durchgeführten Betrachtungen steht die Beantwortung der Frage, ob und wie Smart Microgrids dazu beitragen können, elektrische Energie aus unterschiedlichen Quellen aufzunehmen und die Verbraucher bedarfsgerecht versorgen. Dabei wird insbesondere der zeitliche Ausgleich von Angebot und Nachfrage innerhalb des lokalen Energiesystems untersucht.

**TP 2 – Energiesystemtechnik:** Ziel dieses Teilprojekts ist die Erarbeitung eines Energiemanagementkonzepts, welches unter Einbeziehung der in den betrachteten Gemeinden vorhandenen Potenziale der Energiebereitstellung aus regenerativen Quellen (Photovoltaik, Wind und Bioenergie) und des Lastmanagements in landwirtschaftlichen und Gewerbebetrieben, eine netzdienliche Austauschleistung mit dem vorlagerten Netz ermöglicht.

## Hintergrund des Projekts

Ziel des Teilprojekts ist die Analyse der technisch-ökonomischen Machbarkeit des lokalen zeitlichen Ausgleichs von Energieangebot und -nachfrage. Aus volkswirtschaftlicher Sicht kann durch diesen Ansatz den steigenden Anforderungen an die Netze durch dezentrale und fluktuierend einspeisende Erzeugungsanlagen begegnet werden [1]. Innerhalb des liberalisierten Strommarktes ist der angestrebte lokale Ausgleich unter Berücksichtigung des freien Wettbewerbs zwischen Energieerzeugung, Energiehandel und den Kunden zu betrachten. Da die wirtschaftlichen Ziele der Marktteilnehmer mit dem Ziel des lokalen Ausgleichs innerhalb des Energiesystems in Konkurrenz stehen können, sind regulatorische Eingriffe erforderlich [2].

## Lösungsweg

Im Rahmen des Projekts werden die betrachteten Energiesysteme in zwei getrennt durchgeführten Betrachtungen einerseits hinsichtlich der betriebswirtschaftlichen Ziele der beteiligten Akteure und andererseits hinsichtlich der technischen Zielvorstellung bezüglich des Gesamtsystems untersucht.

Durch die Leuphana Universität Lüneburg wurde im Rahmen des Teilprojekts 3 (Finanzierungskonzepte) dazu zunächst untersucht, welche Anreizsysteme und Geschäftsmodelle hinsichtlich des regionalen zeitlichen Ausgleichs von Angebot und Nachfrage den einzelnen Akteuren derzeit zur Verfügung stehen [3]. Aus den Ergebnissen

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

Smart Microgrids – Effiziente Nutzung erneuerbarer Energien durch regionale ressourcenoptimierte ‚intelligente‘ Versorgungs- und Verbrauchsnetze

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Bildung und Forschung.

### Förderkennzeichen:

03EK3524 B

### Laufzeit des Vorhabens:

01.06.2013 bis 31.05.2016

### Berichtszeitraum:

01.06.2013 bis 30.09.2015

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Projektkoordinator:

Dr. H.-Peter Neitzke (ecolog Institut),  
Dipl.-Ing. Verena Spielmann

E-Mail: verena.spielmann@tu-clausthal.de



H.-Peter Neitzke



Verena Spielmann

der Analyse werden entsprechende Geschäftsmodelle und zugehörige Vermarktungsstrategien für die im System vorhandenen Anlagen (PV-, Wind- und Biogasanlagen, sowie steuerbare und nicht-steuerbare Lasten und Speicher) abgeleitet und in einem betriebswirtschaftlichen Modell implementiert. Ergebnis dieser Betrachtungen sind die wirtschaftlich motivierten Fahrpläne der einzelnen Anlagen und die zugehörigen Speicherkapazitäten. Durch die Summation der Fahrpläne der einzelnen Anlagen ergibt sich die Austauschleistung zwischen dem betrachteten System und der Umgebung. Gleichermaßen wird die insgesamt wirtschaftlich motivierte Speicherkapazität bestimmt.

Am Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme wurde im Rahmen des Teilprojekts 2 (Energiesystemtechnik) ein modulares Modell eines Energiemanagementkonzepts erarbeitet, welches auf den verfügbaren Daten (Einspeise- und Lastzeitreihen in 15-Minuten-Intervallen) basiert. Ziel des Managementkonzepts ist der Ausgleich der Energiebilanz für eine vorgegebene Zeitreihe der Austauschleistung mit dem umgebenden System in jedem Simulationsschritt. Als Ziele können beispielsweise die Verringerung von Netzausbaumaßnahmen, Energiebereitstellung zu Hochlastzeiten oder die Bereitstellung von Regelleistung als Zeitreihe der Austauschleistung zwischen dem betrachteten Energiesystem und dem vorgelagerten Netz formuliert werden. Über die entsprechende Vorgabe der Austauschleistung kann das Managementkonzept sowohl für den Netzparallelbetrieb als auch für den Inselnetzbetrieb eingesetzt werden.

Für die zu betrachtenden Beispielmunicipien können verschiedene Typen von Erzeugern und Verbrauchern einbezogen werden, die sich insbesondere hinsichtlich ihrer Steuerbarkeit unterscheiden. Als nichtsteuerbare Anlagen werden erzeugerseitig Photovoltaik- und Windenergieanlagen einbezogen. Verbraucherseitig gehören zu dieser Kategorie alle Anlagen, die über (Standard-)Lastprofile berücksichtigt werden, wie zum Beispiel die Verbrauchergruppe der Haushalte. Als steuerbare Anlagen werden solche Anlagen

Tabelle 1: Anlagen im betrachteten Beispielsystem (Datengrundlage: [4], [5], [6], [7]).

	Anlage	jährliche Energie	Zeitverhalten	Leistungsbereich
Verbraucher	100 Haushalte	353 MWh	H0-SLP	13,5 – 75,6 kW
	Landwirtschaft	620 MWh	Grundlast +	
periodischer Verbrauch	62,2 – 108,2 kW			
	2 Rührwerke	19,7 MWh	3 Stunden täglich	9 kW
	Eigenbedarf BGA	105 MWh	Grundlast	12 kW
Erzeuger	Biogas-BHKW	< 1.314 MWh	flexibel (1.500 m <sup>3</sup> i.N. Speicher)	50 – 100% BHKW-Nennleistung

einbezogen, deren Leistungsabgabe beziehungsweise -aufnahme entweder zeitlich verschoben und/oder bezüglich des Betrags moduliert werden kann. Erzeugerseitig werden in dieser Kategorie Biogas-Blockheizkraftwerke in die Betrachtung einbezogen, während verbraucherseitig Anlagen zum Beispiel in landwirtschaftlichen Betrieben berücksichtigt werden, deren Leistungsaufnahme abhängig vom Füllstand eines zugeordneten Speichers zeitlich verschoben werden kann. Zu jeder Anlage werden die Restriktionen, wie beispielsweise Mindestlauf- und Pausenzeiten, Maximallauf- und Pausenzeiten, Füllstände der zugeordneten Speicher und die minimale Teillast berücksichtigt. Ergebnis der durchgeführten technischen Betrachtungen sind die Anlagenfahrpläne, die sich unter Berücksichtigung der vorgegebenen Austauschleistung innerhalb des Gesamtsystems ergeben, sowie die zugehörigen Speicherkapazitäten.

Die resultierenden Austauschleistungen und Speicherkapazitäten werden verglichen, um den Beitrag der einzelnen Anreizsysteme bzw. der daraus abgeleiteten Vermarktungsstrategien zum Erreichen der technischen Ziele zu untersuchen. Im Rahmen des Teilprojekts 4 (Betriebliche Konzepte) wurden die Biogas-Erzeugungspotenziale, sowie die Potenziale des Lastmanagements im landwirtschaftlichen Bereich durch die Hochschule Neubrandenburg erarbeitet. Landwirtschaftsbetriebe treten in den im Rahmen des Projekts betrachteten ländlichen Regionen sowohl als

Energieerzeuger auf und bieten gleichermaßen das Potenzial zur Flexibilisierung eines Teils ihrer Lasten, sodass sie wichtige Akteure zum Ausgleich zwischen lokalem Energiedargebot und lokaler Nachfrage sind.

Vor diesem Hintergrund wird die erarbeitete Methodik am Beispiel eines Energiesystems bestehend aus einem Landwirtschaftsbetrieb mit energieintensiver Ferkelaufzucht, der eine Biogas-Anlage mit angeschlossenem BHKW betreibt, und einer Gemeinde mit 100 Haushalten erläutert (vergleiche [13]).

Als Erzeuger steht im System lediglich das Biogas-BHKW zur Verfügung, welches durch die Nutzung eines Biogasspeichers im Leistungsbereich zwischen 50 und 100 Prozent seiner Nennleistung betrieben werden kann. Verbraucherseitig werden als nicht-steuerbare Lasten die Haushalte (H0-SLP) und die Grundlast des Landwirtschaftsbetriebs (Heizung und Lüftung) sowie die periodisch durchgeführte Fütterung berücksichtigt. Als steuerbare Lasten stehen die Rührwerke der Biogas-anlage und die Mahl- und Mischanlage zur Futteraufbereitung zur Verfügung. Die im System berücksichtigten Anlagen sind in Tabelle 1 charakterisiert. Die Biogasanlage wird mit Schweinegülle aus dem Landwirtschaftsbetrieb und lokal vorhandener Maissilage betrieben.

Zur Versorgung der verschiedenen Verbraucher ergeben sich aus den vorhandenen Anreizsysteme-

Tabelle 2: Vermarktungswege der durch das Biogas-BHKW bereitgestellten Energie innerhalb des betrachteten Systems ([7], [8], [9]).

	Anlage	Vermarktungsweg	Erlösmöglichkeit
Verbraucher	Haushalte	DV mit Marktprämie	Haushaltsstrompreis + Marktprämie, Einsparung Stromsteuer wegen räumlicher Nähe
	Landwirtschaft	DV mit Marktprämie	Gewerbestrompreis + Marktprämie, Einsparung Stromsteuer wegen räumlicher Nähe
	Rührwerke	Eigenverbrauch	Einsparung Netzentgelte und zugeordnete Umlagen, red. EEG-Umlage
	Börse	DV mit Marktprämie	Börsenpreis + Marktprämie

men die in Tabelle 2 dargestellten unterschiedlichen Vermarktungsoptionen.

Neben der Versorgung der Kunden direkt aus dem Biogas-BHKW werden ebenfalls der Zukauf und der Verkauf von Energie an der Strombörse berücksichtigt, wenn die dortigen Preise eine kostengünstigere Versorgung der Verbraucher erlauben. Ebenso ist eine Vermarktung von überschüssiger Energie an der Börse vorgesehen, wenn diese gegenüber der lokalen Direktvermarktung wirtschaftlich vorteilhaft ist.

Aus der betriebswirtschaftlichen Betrachtung verschiedener BHKW-Größen in Kombination mit einer Biogasanlage, die eine elektrische Dauerleistung von 150 kW ermöglicht, ergeben sich die in Abbildung 1 dargestellten Erlöse, wobei die steigenden Werte bei zunehmender installierter BHKW-Leistung im Wesentlichen durch den steigenden Erlös aus der Markt- und der Flexibilitätsprämie verursacht werden.

Neben der betriebswirtschaftlichen Betrachtung wird ebenfalls der netzdienliche Lastfolgebetrieb des BHKW zur Bereitstellung einer konstanten Austauschleistung mit dem umgebenden System untersucht. Da ein BHKW mit einer installierten Leistung von 270 kW die höchsten jährlichen Überschüsse ermöglicht, wird für die technische

Betrachtung ebenfalls ein BHKW mit dieser installierten Leistung angenommen.

Unter Berücksichtigung der Wirkungsgradeinbußen im Teillastbetrieb des BHKW ergibt sich eine jährlich konstante Ausspeiseleistung von 19,8 kW. Im betriebswirtschaftlich orientierten Betrieb schwankt die Austauschleistung zwischen 129 kW (Ausspeisung) und -18 kW (Energiebezug). Ohne lokale Versorgung der Verbraucher und ohne Lastmanagement der flexiblen Anlagen im Landwirtschaftsbetrieb beträgt die gleichzeitige viertelstündliche Bezugsleistung des angenom-

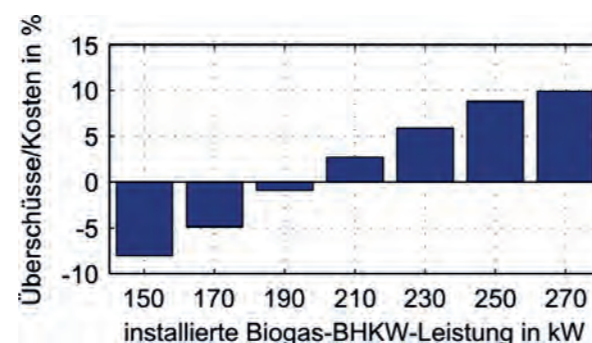


Abbildung 1: Jährliche Erlöse bezogen auf die jährlichen Kosten der Direktvermarktung an lokale Kunden und Zu- und Verkauf an der Strombörse.

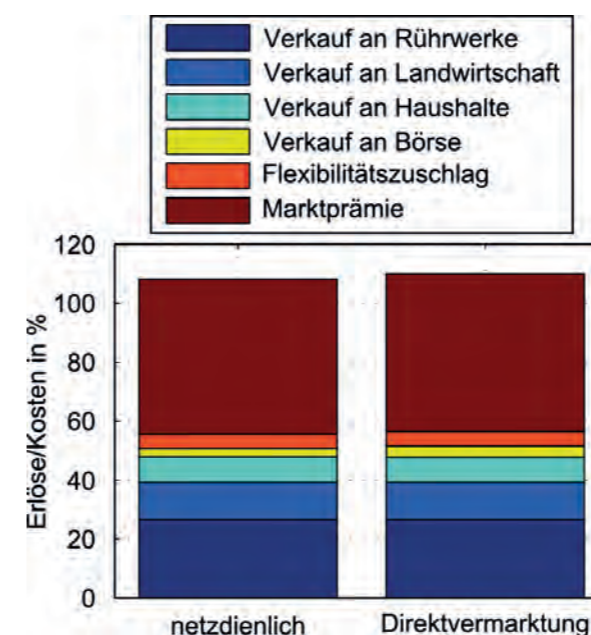


Abbildung 2: Anteile der Erlöse in Bezug auf die Kosten für den netzdienlichen Betrieb und die Direktvermarktung mit einer installierten BHKW-Leistung von 270 kW.

menen Systems maximal 166 kW. Somit wird durch beide betrachtete Betriebsweisen potenziell eine Netzentlastung erreicht.

Abbildung 2 stellt die erwirtschafteten Erlöse in den beiden betrachteten Fällen gegenüber. Für den netzdienlichen Betrieb werden dieselben Vermarktungswegen wie für den Fall der Direktvermarktung angenommen. Der Unterschied besteht darin, dass sich der Betrieb des BHKW im netzdienlichen Fall nicht nach den Börsenpreisen richtet und dieser Anteil folglich gegenüber der betriebswirtschaftlich orientierten Direktvermarktung geringer ist. Zum Ausgleich der finanziellen Einbußen des Anlagenbetreibers durch den netzdienlichen Betrieb seiner Anlage im Energiesystem wäre im betrachteten Beispiel eine zusätzliche Vergütung von 0,31 ct/kWh erforderlich, die durch von der konstanten Austauschleistung profitierenden Akteur zu entrichten wäre.

Die beispielhaft durchgeführte Betrachtung zeigt, dass unter den getroffenen Annahmen ein Biogas-BHKW wirtschaftlich in der lokalen Direktvermarktung im Sinne eines Smart Microgrids betrieben werden kann, wobei die erzielbaren Erlöse mit der installierten BHKW-Leistung zunehmen, da damit Marktprämie (größter Anteil der Erlöse) und Flexibilitätsprämie steigen. Die Spitzen der Austauschleistung werden in der netzdienlichen Anlagenfahrweise und in der Direktvermarktung gegenüber dem Referenzfall (ohne lokale Energiebereitstellung, ohne Lastmanagement) reduziert.

### Projektstand

Innerhalb des Berichtszeitraums wurde die entwickelte Methode in der Betrachtung verschiedener Beispielsysteme umgesetzt (vergleiche [10], [11], [12], [13] und [14]).

In den beteiligten Modellgemeinden haben Akteurswerkstätten unter Leitung des ecolog Instituts und mit Beteiligung der Praxispartner stattgefunden. Die Ableitung detaillierter Anwendungsfälle und Ziele für die einzelnen Gemeinden sowie die darauf aufbauende Umsetzung der entwickelten Methode und die Anpassung der vorhandenen Modelle an die Anforderungen in den Modellgemeinden stehen derzeit noch aus.

### Literatur

- [1] Energietechnische Gesellschaft im VDE (Hrsg.): VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020. Frankfurt am Main, 2007
- [2] Aichele, C.; Doleski, O.: Idee des intelligenten Energiemarktes. In: Smart Market: Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt. Wiesbaden: Springer Verlag, 2014
- [3] Bettinger, C.; Holstenkamp, L.: A systematic survey of business models for smart micro-grids under current legal and incentive conditions, ETG-Kongress 2015, 16. und 7. November 2015 in Bonn (Veröffentlichung angenommen)
- [4] FNR (Hrsg.): Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zu Nutzung. 6. Aufl. Gülzow-Prü-

- zen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2013
- [5] Eckel, H.; Büscher, W.; Feller, B. ; Fritzsche, S. ; Gaio, C.; Kämper, H. ; Neiber, J.: Energiebedarf in der Schweine und Hühnerhaltung. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 2014
- [6] ASUE (Hrsg.): BHKW-Kenndaten 2011. Berlin, 2011
- [7] Grotholt, C.; Liesner, S.: Die Auswirkungen von bedarfsgerechter Erzeugung auf das BHKW. Berlin, 2013 (3. VDI-Fachkonferenz bedarfsorientierte Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan)
- [8] Loibl, H.: Die Eigenstromnutzung nach dem EEG 2014. In: Zeitschrift für neues Energierecht (2014), Nr. 5, S. 437–440

- [9] Buchmüller, C.: Geschäftsmodelle zur regionalen Direktvermarktung von Strom aus Erneuerbaren Energien. In: Zeitschrift des Instituts für Energie- und Wettbewerbsrecht in der kommunalen Wirtschaft (2014), Nr. 1, S. 5–9
- [10] Skau K., Bettinger C., Schild V., Fuchs C. & Beck H.-P. 2015: Betriebsstrategien für Biogas-anlagen zwischen netzdienlichem und wirtschaftlich orientiertem Betrieb. 9. Rostocker Bioenergieforum. Rostock, Band 52, S.277-289, 18. und 19. Juni 2015
- [11] Skau, K., Fuchs, C., Bettinger, C., Spielmann, V., Beck, H-P. 2015: Renewable Energy – Opportunities for production and use of electrical power for farmers under conditions of the renewable energy act in Germany, Proceedings of the 19th International Farm Management Association Congress, Quebec, Kanada, Peer Reviewed Papers in Proceedings Volume I, p. 429-435, 12 – 18 Juli 2015.
- [12] Spielmann V., Bettinger C., Skau K., Beck H.-P. & Fuchs C. 2015: Auswirkungen der Anreizsysteme für private PV-Anlagenbetreiber auf das lokale Verteilnetz. NEIS-Konferenz 2015 Hamburg, 10. und 11. September 2015 (Veröffentlichung angenommen).
- [13] Skau, K., Bettinger, C., Spielmann, V., Fuchs, C., Beck, H-P. 2015: Speicherung von PV-Energie und Nutzung in der Milchproduktion – Netzdienlichkeit und Wirtschaftlichkeit, Posterbeitrag zur GeWiSoLa-Tagung 2015, Gießen (Veröffentlichung angenommen)
- [14] Spielmann V., Bettinger C., Skau K., Beck H.-P. & Fuchs C. 2015: A highly transparent method of assessing the contribution of incentives applied to technical challenges in decentralised energy systems. ETG-Kongress 2015, 16. und 7. November 2015 in Bonn (Veröffentlichung angenommen)

## Projektpartner

### Projektkoordination

- Ecolog Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung (Projektkoordination)
- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

### Beteiligte Institute

- Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal
- Hochschule Neubrandenburg
- Leuphana Universität Lüneburg

### Externe Partner

- Stadtwerke Neustrelitz
- Landeszentrum für erneuerbare Energien Mecklenburg-Vorpommern
- Energie Ressourcen Agentur Goslar
- Volkswind Immenrode

## Problemstellung

Vor dem Hintergrund abnehmender Kraftwerksleistung aufgrund des Atomausstiegs und der Abschaltung alter Kohlekraftwerke und des zögerlichen Zubaus neuer Großkraftwerke wird das Energieversorgungssystem vor große Herausforderungen gestellt. Zudem ist eine Flexibilisierung des Versorgungssystems wegen der immer steiler verlaufenden Residuallastgradienten notwendig. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie in Zukunft Momentanreserve sowie Primär- und Sekundärregelleistung erbracht werden sollen, die bislang von Großkraftwerken bereitgestellt wurden.

## Ziel

Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Erprobung innovativer Ladegeräte und Ladealgorithmen für Elektrofahrzeuge, um damit einen Beitrag zur dynamischen Systemstabilität elektrischer Netze liefern zu können.

## Lösungsweg

Im Kern der Arbeiten stehen Untersuchungen zur Einbindung automobiler Energiespeicher in die elektrische Energieversorgung zur Erbringung von dezentralen, standortabhängigen Systemdienstleistungen.

Des Weiteren wird die Nutzung der Fahrzeugspeicher zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch in den Bilanzgrenzen der Kundenanlage – der sogenannten „Prosumerzelle“ – betrachtet. Hierzu ist eine kommunikative Verbindung des Hauptzählers am Hausanschluss mit dem Fahrzeug und ggf. mit den Erzeugern, wie Photovoltaik-Anlage (PV) oder Blockheizkraftwerk (BHKW), und weiteren steuerbaren Verbrauchern erforderlich.

Andere derzeit laufende und angestrebte Projekte nutzen die Speicher von Elektrofahrzeugen als reine Energiespeicher. In diesem Projekt wird die Nutzung der Fahrzeugbatterien als „Leistungsspeicher“ für die Bereitstellung von Momentan-

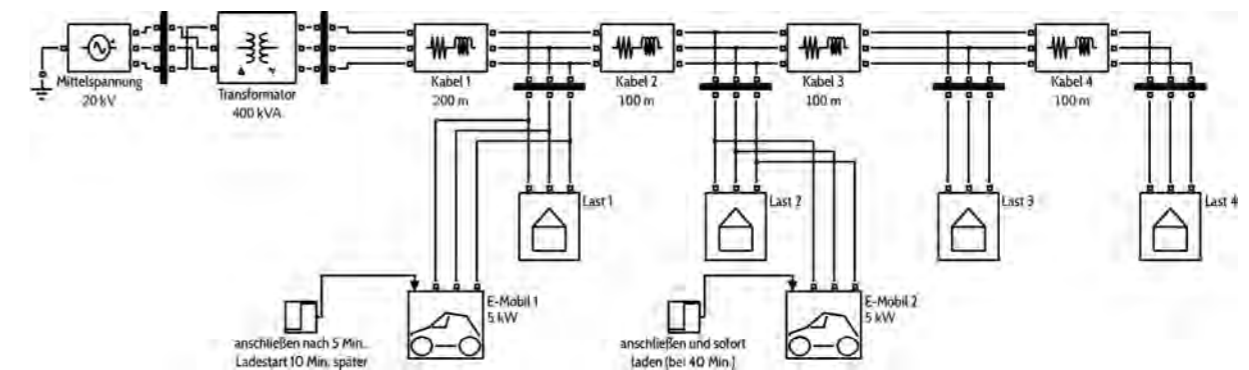


Abbildung 1: Einfaches Netzmodell zur Untersuchung verschiedener Szenarien in Bezug auf Last- und Erzeugungssituationen sowie Anschluss und Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen in Matlab/Simulink

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Schaufenster Elektromobilität –  
Tanken im Smart Grid

**Fördernde Stelle:**  
Bundesministerium für Wirtschaft und  
Energie (BMWi)

**Förderkennzeichen:**  
16SN1005D

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.01.2013 bis 31.12.2015

**Verantw. Projektleiter:**  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

**Projektkoordinator:**  
Dipl.-Ing. Benjamin Schwake,  
Dr.-Ing. Dirk Turschner

**E-Mail:** benjamin.schwake@tu-clausthal.de



Hans-Peter Beck

Dirk Turschner

reserve, zur Primärregelung und weitergehende Systemdienstleistungen untersucht.

Aufgrund unterschiedlicher Topologien und lokaler Lastzustände ist für die Parametrisierung der dynamischen Reaktion der Laderegler auf Netzereignisse eine standortbezogene Optimierung der Parameter von Vorteil.

Als mobile Einheiten können Elektrofahrzeuge während der netzgekoppelten Phase (Plugged-In) den aktuellen Zustand des lokalen Netzbereiches diagnostizieren und für Netzbetreiber wertvolle Daten erheben. Die erhobenen Daten werden in aggregierter Form als „Power Quality Map“ zur Verfügung gestellt. Im Kontext der Entwicklung hin zum „Smarter Grid“ kann auf diese Weise das Sensornetz für eine Netzüberwachung dichter geknüpft werden, um somit eine weiterhin hohe Versorgungsqualität zu gewährleisten.

Im Rahmen dieses Projektes werden die beschriebenen drei Funktionalitäten Systemdienstleistungen, Prosumerzellenoptimierung und Power Quality Map untersucht beziehungsweise entwickelt, anhand von Laboraufbauten erprobt und in marktverfügbare Elektrofahrzeuge integriert.

### Projektstand

Das Projekt ist in Bearbeitung. Eine Laufzeitverlängerung um eine halbes Jahr, bis zum 30.06.2016, ist beantragt.

### Ergebnisse

Zur Analyse möglicher Szenarien und zur Auslegung eines intelligenten Lademanagements wird ein vereinfachtes Netzmodell (Abbildung 1) genutzt. Mit Hilfe des Modells können verschiedene Last- und Erzeugungssituationen in einem Niederspannungsnetzausläufer dynamisch simuliert werden. Auf Basis der Simulationsergebnisse können die Auswirkungen des Ladens von Elektrofahrzeugen an verschiedenen Punkten im Netz genauer untersucht werden.

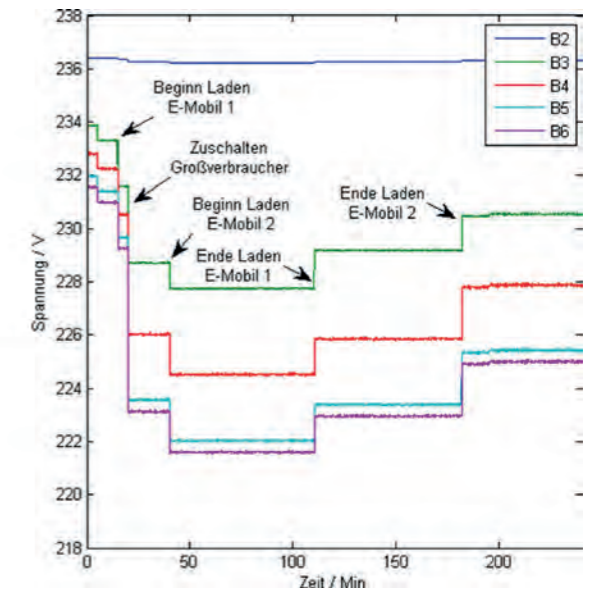
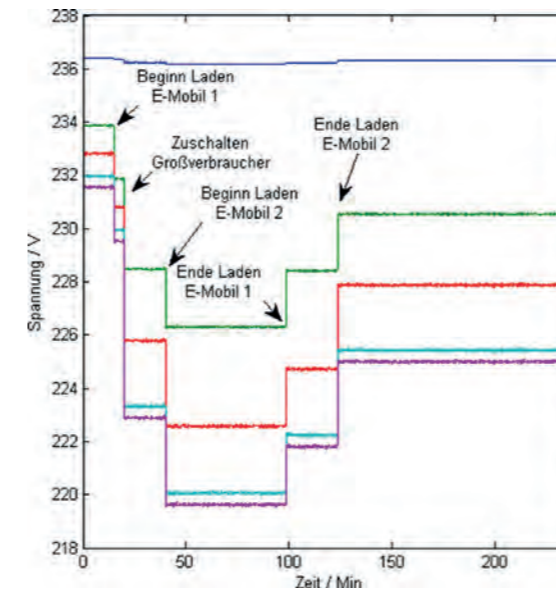


Abbildung 2: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ladeverhaltens ohne (links) und mit (rechts) netzdienlichem Ladeverfahren entsprechend Abbildung 1.

Eine Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse für das Laden von zwei Elektrofahrzeugen entsprechend der Anordnung in Abbildung 1 ist in Abbildung 2 dargestellt. Für die erste Simulation (links) wurde von einer Ladung mit konstanter Leistung (Nennleistung) ausgegangen. Bei der zweiten Simulation (rechts) wurde für beide Fahrzeuge das neue, netzdienliche Ladeverfahren angenommen. Beim Vergleich der Spannungsverläufe ist zu erkennen, dass die Spannungseinbrüche mit dem netzdienlichen Ladeverfahren reduziert werden können.

Die Simulationsergebnisse (Abbildung 2) zeigen, dass sich die Spannungseinbrüche durch das netzdienliche Ladeverfahren reduzieren lassen. Dies geschieht auf Kosten der Ladedauer, was Abbildung 3 verdeutlicht. Wie sich feststellen lässt, steigt die Ladedauer für Fahrzeuge, die weiter hinten am Strang angeschlossen sind, deutlich stärker an als für Fahrzeuge, die weiter vorne angeschlossen sind. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass im einfachsten Fall beim netzdienlichen Laden auf eine feste Nennspannung (zum Beispiel

230 V) geregelt wird. Das bedeutet, dass bei einer Abweichung von dieser Nennspannung die Ladeleistung angepasst wird, zum Beispiel wird mit höherer Leistung, das heißt beschleunigt, geladen, wenn die lokal gemessene Spannung über dem Nennwert liegt. Da die Netzspannung aufgrund des Spannungsabfalls über der Netzleitung grundsätzlich ortsabhängig, das heißt lokal unterschiedlich ist, wird es bei Regelung auf eine feste Nennspannung immer zu örtlichen Ungleichbehandlungen von Fahrzeugen kommen, die sich mit dem netzdienlichen Ladeverfahren an der Netzstabilisierung beteiligen.

Um zu verhindern, dass Fahrzeuge, die weiter hinten an einem Netzausläufer laden, grundsätzlich durch eine länger Ladedauer benachteiligt werden, ist es sinnvoll, lokale Nennspannungen für das Ladeverfahren/die Regelung zu definieren. Dies kann über die Power-Quality Map, die ebenfalls im Projekt entwickelt wird, geschehen.

Die Regelung des Ladegeräts richtet sich nach dem Blockschaltbild in Abbildung 4. Die Ladelei-

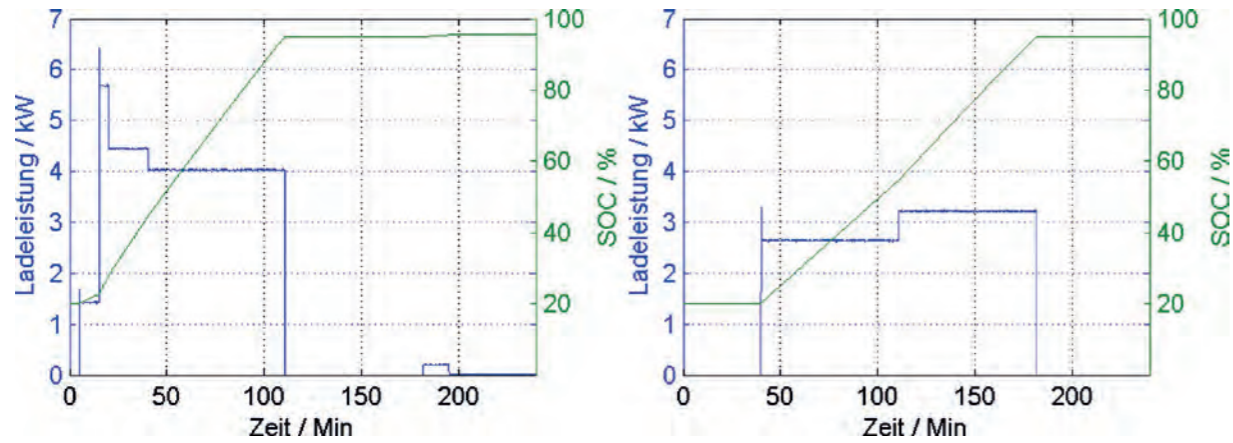


Abbildung 3: Vergleich der Simulationsergebnisse des Ladeverhaltens von Fahrzeug 1 (links) und Fahrzeug 2 (rechts) mit netzdienlichem Ladeverfahren entsprechend Abbildung 1

Die Ladeleistung wird abhängig von den Abweichungen von Frequenz und Spannung bezogen auf die vorgegebenen Nennwerte ( $f_0^*, U_0^*$ ) gegenüber der Nennleistung  $P_0^*$  erhöht oder reduziert. Weiterhin besteht die Möglichkeit die Nennleistung über  $\Delta P_0^*$  für einen Lastausgleich in der Prosumerzelle anzupassen.

Die rot markierten Parameter in Abbildung 4 können im Betrieb über die Power-Quality Map nachgeführt werden. Besteht keine Verbindung zur Power-Quality Map arbeitet das Ladegerät eigenständig mit dem fest vorgegebenen Parametersatz. So ist bleibt das dynamische Verhalten des Ladegeräts und die Reaktionsfähigkeit auf lokale Netzereignisse auch ohne Online-Verbindung erhalten.

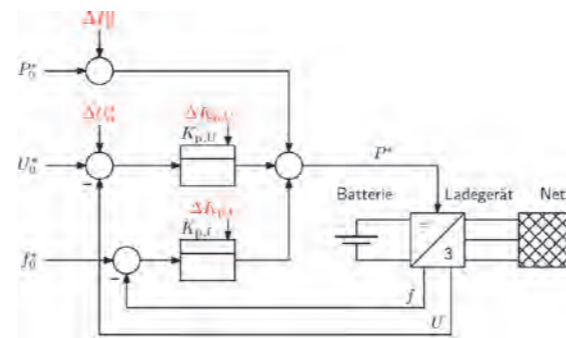
### Messwernerfassung und Datenübertragung

Die Anforderungen an die Power-Quality Map zur Speicherung und Visualisierung des orts aufgelösten Netzzustandes sowie zur Parameteroptimierung des Ladeverfahrens wurden spezifiziert.

Für die Kommunikation mit der Power-Quality Map und zur Datenübertragung zwischen den einzelnen Geräten wurden mit den Projektpart-

nern die einzelnen Kommunikationswege und die zugehörigen Übertragungsprotokolle spezifiziert.

Für die ortsfeste, genaue Messung der ortsunabhängigen Netzfrequenz im Verbundnetz sowie für die stationäre Messung des lokalen Netzzustandes und des Lastflusses in den Haushalten bzw. den Prosumerzellen wurde eine Messbox entwickelt. Abbildung 5 zeigt eine solche Messbox und einen zugehörigen Messschrieb einer Messung des Netzzustandes.



$P_0^*$ : Nenn-Ladeleistung  
 $U_0^*$ : Nennspannung (230V)  
 $f_0^*$ : Nennfrequenz (50 Hz)

Abbildung 4: Reglerstruktur des netzdienlichen Ladeverfahrens

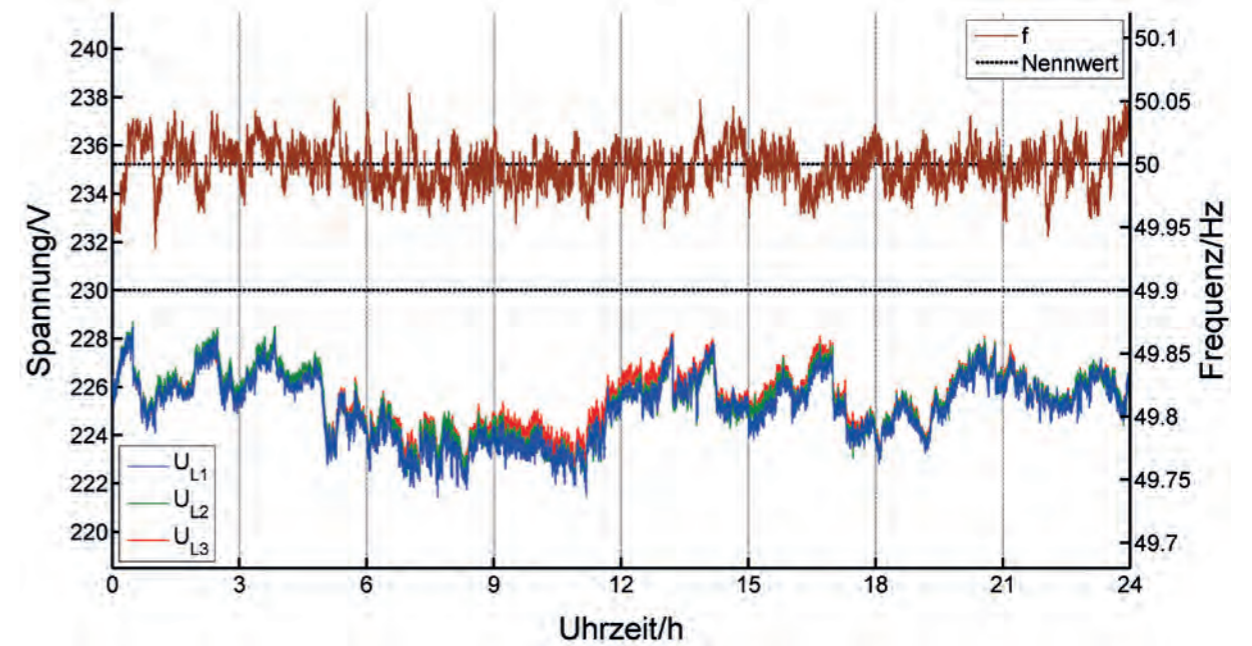
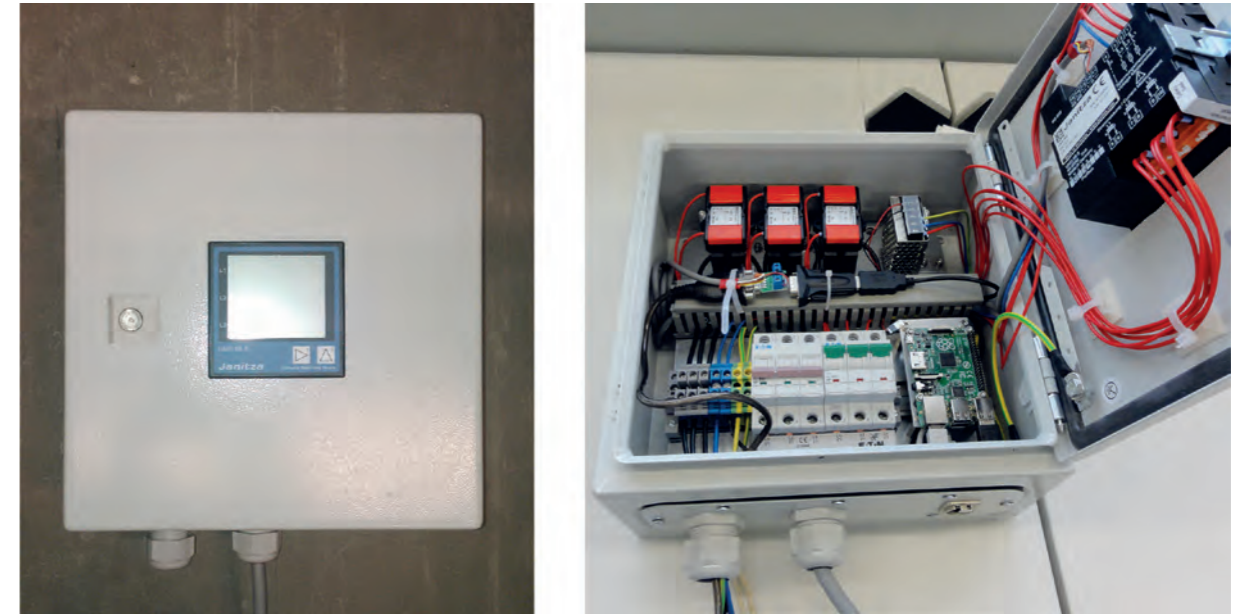


Abbildung 5: (oben) Entwickelte Messbox zur stationären Überwachung des Netzzustandes und Lastflussmessung in der Prosumerzelle mit Anbindung an die Power-Quality Map; (unten) Mit einer Messbox aufgenommener Netzzustand und Lastfluss

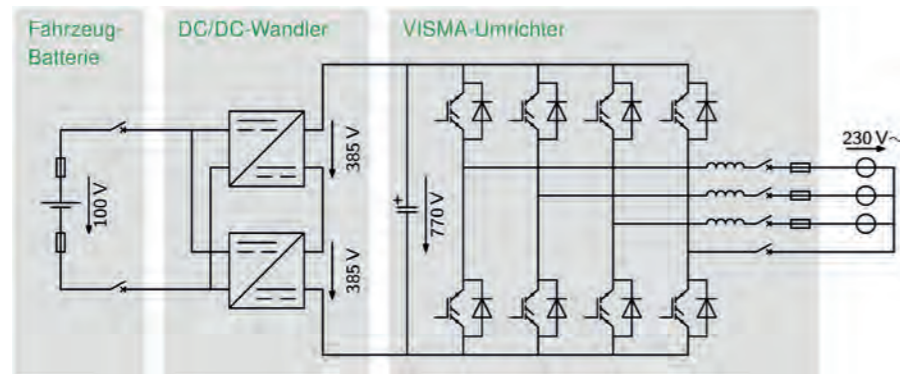


Abbildung 6: Schema VISMA-Ladegerät für den hochschuleigenen Smart Roadster

## Entwicklung und Untersuchung der Ladetechnik

Im Rahmen des Projekts werden drei technische Entwicklungslinien verfolgt:

1. Für das hochschuleigene Versuchsfahrzeug wird ein rückspeisefähiges Ladegerät nach dem Prinzip der Virtuellen Synchronmaschine (VISMA) entwickelt und aufgebaut.
2. Zusammen mit der FINE Mobile GmbH als

Lieferant marktverfügbarer Elektrofahrzeuge werden zwei Fahrzeuge mit entsprechend modifizierter Ladetechnik zur lastabhängigen Ladeleistungsmodulation aufgebaut.

3. Die RegenerativKraftwerke Harz (RKWH) erweitern ihre auf Elektroantrieb umgerüstete Audi A2 um ein dreiphasiges Schnellladegerät, das ebenfalls das netzdienliche Laden unterstützen soll.

Abbildung 6 zeigt das Schema des Ladegeräts, der für das hochschuleigene Versuchsfahrzeug – ein auf Elektroantrieb umgerüsteter Smart-Roadster – entwickelt wird. Der Ladeumrichter setzt sich aus einem batterie-seitigen, bidirektionalen Gleichspannungswandler, für die Anpassung der Batteriespannung von 100 V auf die Zwischenkreisspannung von 700 V, und einem netzseitigen Puls-Wechsel-/ Gleichrichter in Brückenschaltung zusammen.

Die zugehörige Laderegulation ist so konzeptioniert, dass sie netzstützend agiert, ohne auf eine Kommunikation mit einem zentralen Managementsystem angewiesen zu sein. Dazu werden die Netzparameter Frequenz und Spannung ausgewertet und es wird entsprechend der Primärregelung eines Kraftwerks mit einer angepassten Ladeleistung darauf reagiert. Durch eine zusätzliche, nicht zwingend erforderliche Kommunikationsverbindung zur Power-Quality-Map können die Regelparameter standort- und netzparameterabhängig nachgeführt und damit das Ladeverhalten weiter optimiert werden.

### Projektpartner

#### Projektkoordination

- TU Clausthal

#### Beteiligte Institute

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
- Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal
- Institut für Elektrische Informationstechnik, TU Clausthal
- Institut für Informatik, TU Clausthal

#### Externe Partner

- Bornemann AG
- Bundesverband Solare Mobilität e.V.
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- RegenerativKraftwerke Harz GmbH u. Co. KG

Im Projekt „Schnellladung von Elektrofahrzeugen“ steht das Energie-Forschungszentrum Niedersachsen Seite an Seite mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut in Goslar. Schnellladealgorithmen werden entwickelt, die ein schnelles, aber schonendes Laden der Fahrzeugbatterien unter Berücksichtigung der Temperatur ermöglichen. Weiter werden Ladesäulen entwickelt, aufgestellt und ein Businesscase für Tankstellenbetreiber im Zeitalter der Elektromobilität erarbeitet.

Ein gängiges Problem der Elektromobilität zur Akzeptanz in der Bevölkerung ist die Reichweite, welche weitgehend als zu gering eingestuft wird, obwohl die meisten Wege, die täglich zurückgelegt werden in 98,6 Prozent unter 100 km betragen [2][1]. Betrachtet man die reinen Wege mit einem Kraftfahrzeug, so ergibt die Simulation vom KIT auf Grundlage einer Studie [3], dass über 80 Prozent der täglichen PKW-Fahrleistungen unter 125 km liegen und somit die einzelnen Fahrstrecken noch unterhalb dieser Distanz liegen. Dennoch wird von der Bevölkerung gefordert, mit einem

Elektrofahrzeug die gleiche Reichweite wie mit einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zu haben, um keine Restriktionen hinnehmen zu müssen. Um dieses Problem zu lösen, gibt es zum einen die Möglichkeit, größere Batterien zu benutzen, was den Preis vergrößern und somit wiederum zu einer abnehmenden Akzeptanz führen würde und zum anderen die Möglichkeit schnell nachladen zu können, was die „Reichweitenangst“ reduzieren würde. Aus diesem Grunde ist die Schnellladung ein wichtiges Thema bei der Einführung der Elektromobilität. Zwar gibt es bei verschiedenen Herstellern von Elektrofahrzeugen gegen Aufpreis die Zusatzoption „Schnellladung“ auch mit Angaben wie „in 30 Minuten bis zu 80 Prozent geladen“ oder „Schnellladung in 45 Minuten“, jedoch ist der Anfangszustand häufig nicht definiert und meist liegt eine Schnellladung nur im Bereich von 20 auf 80 Prozent in 45 Minuten vor, was bedeutet, dass eine komplette Vollladung 1,25 Stunden dauern würde, wenn die ersten und letzten 20 Prozent ebenfalls in der gleichen Zeit realisiert werden könnten, was standardmä-



Abbildung 1: Applikation der Fasern auf den Zellen



Abbildung 2: Batterieblock mit Fasern



## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Schnellladung von Elektrofahrzeugen

**Fördernde Stelle:**  
EFRE bzw. MWK

**Förderkennzeichen:**  
WA3-80127299 / ZW6-80127299

**Laufzeit des Vorhabens:**  
1.2.2012 bis 30.10.2014

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. H.-P. Beck,  
Prof. Dr. Wolfgang Schade

**Projektkoordinator:**  
Dr.-Ing. Raoul Heyne

**E-Mail:** Raoul.Heyne@efzn.de



Wolfgang Schade



Raoul Heyne

ßig nicht der Fall sein wird. Dieses Projekt hat sich hingegen zum Ziel gesetzt, eine herkömmliche Fahrzeugbatterie von 0 auf 100 Prozent in unter 30 Minuten zu laden. Erreicht wird das, indem im Projekt neue Ladeverfahren entwickelt werden, wozu verschiedenste Ideen, wie Stufenladungen, Pulsladungen und Temperaturkonstantladungen entwickelt, untersucht und bewertet werden.

Um diese Ladungen realisieren zu können, müssen jedoch Vorbereitungen getroffen werden. Ein wichtiger Punkt ist zusätzliche Sicherheitstechnik für die Schnellladungen. Zu diesem Zweck wurden faseroptische Sensoren vom Projektpartner Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut eingesetzt. Mit diesen können ganze Temperaturfelder aufgenommen werden und sie haben auf Grund ihrer Größe den Vorteil, dass sie in quasi jede Batterie zugefügt werden können, sodass die Geometrie der Batterie nicht verändert werden muss und Schnellladungen mit nahezu allen in Serie befindlichen Batterien realisiert werden können. Die Ausstattung der Batterien mit diesen Sensoren ist in Abbildungen 1 und 2 zu sehen.

Damit können im Projekt ganze Temperaturfelder aufgezeichnet werden, wie in Abbildung 3 zu sehen.

In dem Projekt konnte dabei erlernt werden, dass eine direkte Befestigung der Temperatursensoren auf der Oberfläche der Batterie nicht sinnvoll ist, zumal die Temperatur über die Dehnung der Faser gemessen wird und sich die Batterie, abhängig vom Ladezustand, ebenfalls ausdehnt. So kann die Temperatur nur schwerlich gemessen werden, aber es zeigte sich, dass die Messung der Dehnung der Batterie ein besserer Sicherheitsindikator als die Temperatur ist, sodass bei folgenden Projekten eher die Dehnung mit Temperaturkompensation als Indikator herangezogen werden wird.

Mit Hilfe dieser Sicherheits- und Überwachungstechnik werden anschließend die verschiedenen Ladeverfahren erprobt. Dabei werden erst Zellen, dann Module, dann Rollerbatterien und anschließend ganze Fahrzeugbatterien mit den neu-

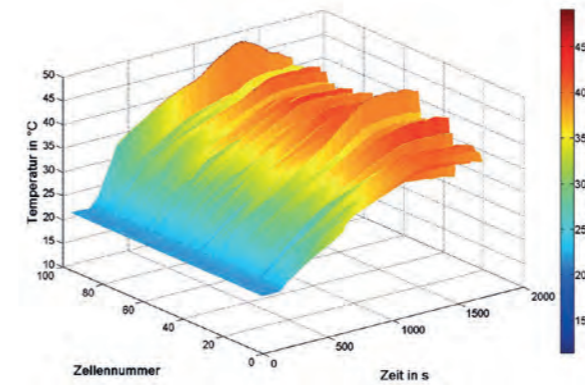


Abbildung 3: Temperaturverlauf bei einer Schnellladung

entwickelten Ladeverfahren untersucht. Einen kleinen Teil der Ergebnisse zeigt die Tabelle in Abbildung 4.

Deutlich zu erkennen ist, dass hier die Ladedauern für die Ladung von 0 auf 80 Prozent und von 0 auf 100 Prozent dargestellt werden. Es zeigt sich, dass viele Verfahren zu einer Ladezeit von weniger als 30 Minuten führen. Dabei liegt die Stromkonstant-Spannungskonstantladung mit 0,31 Stunden als schnellste Ladung vorne, jedoch gibt es bei ihr

auch hohe Temperaturanstiege, welche bei der Pulsladung als zweitschnellste Ladung geringer ausfallen, sofern die maximale Laderate von 4C für diese Zellen nicht überschritten werden soll. Weiter zeigt sich, dass die Stufenladung zwar am langsamsten ist, sich die Zellen aber auch am wenigsten erwärmen. Im Gegensatz zu Ladungen mit kleinen C-Raten ist diese Ladung bei gleicher Temperaturerwärmung schneller, wie auch aus der Literatur ersichtlich ist [4]. Es lässt sich für die Anwendung an der gesamten Fahrzeugbatterie die Pulsladung als bestes Ladungsverfahren evaluieren.

Mit der Pulsladung werden schließlich die großen Fahrzeugbatterien geladen. Das Ergebnis einer der Ladungen ist in Abbildung 5 zu sehen.

Deutlich zu sehen ist, dass die verwendete Pulsladung erst aus einer Konstantstromladung mit 100 Ampere (2,5 C) besteht. Sobald eine entsprechend der Zellen und des Managementsystems obere Spannungsgrenze erreicht wird, beginnt die eigentliche Pulsladung. Die Pulsladung wird jedoch in der Stromhöhe stufenförmig reduziert, damit das vom Hersteller implementierte Batteriemanagementsystem nicht zu einer Abschaltung führt und mit der Standardbatterie inklusive des Standardmanagementsystems eine Schnellladung realisiert werden kann.

Ladeverfahren	Ladedauer in h		maximale Temperatur in K	Temperaturdifferenz $\Delta T$	
	80%	100%			
IU-Ladung	2C	0,40	0,68	310,35	17,2
	3C	0,27	0,38	318,25	25,1
	4C	0,20	0,31	324,55	31,4
	5 C (15,2 V)	0,16	0,31	318,35	25,2
Stufenladung	3C mit 3 Stufen	0,28	0,74	309,35	16,2
	4C mit 3 Stufen	0,32	0,86	311,25	18,1
Pulsladung	2C 850 ms	0,40	0,67	311,15	18
	3C 850 ms	0,27	0,44	318,95	25,8
	4C 500 ms	0,20	0,40	319,15	26
	4C 850 ms	0,20	0,32	322,95	29,8

Abbildung 4: Tabelle mit verschiedenen Ladeverfahren für einen Kompletten Rollerstack

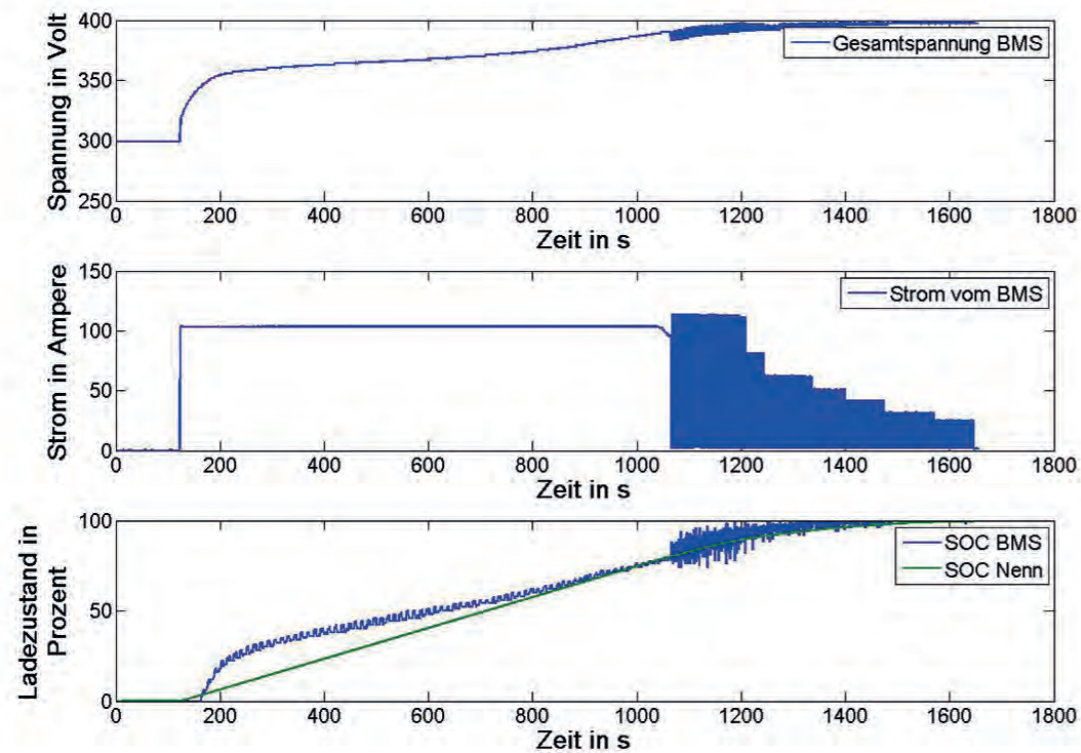


Abbildung 5: Schnellladung der Fahrzeugbatterie in circa 27 Minuten bis 40Ah erreicht sind.

Weiter werden im Projekt zusammen mit dem Projektpartner Power Innovation GmbH Schnellladesäulen entwickelt, die diese Ladeverfahren umsetzen sollen. Vor allem vom Projektpartner Wolfsburg AG wird gefordert, dass die Ladesäulen zumindest auch das CCS-Standardverfahren können müssen, weil es sich um ein Vorläuferprojekt des Schaufenster Elektromobilität handelt und in diesem Projekt geplant ist, mit den Ladesäulen den Harz an die Metropolregion anzubinden. Diese Aufgabe ist sehr schwierig. Das CCS-Protokoll wird von der Automobilindustrie und von deren abgesprochenen Ladesäulenherstellern bis zum Ende des Projektes nicht freigeben. So bleibt nur übrig Standardladesäulen zu beziehen und diese durch den Projektpartner Power Innovation GmbH umbauen zu lassen. In den Fahrzeugen kann auf Grund der fehlenden Kennt-

nis des CCS-Protokolls lediglich das ChaDeMo-Protokoll realisiert werden, sodass diese ebenfalls ein standardisiertes Ladeverfahren haben. Die Ladesäulen werden nun so umgerüstet, dass sie CCS, ChaDeMo und die Möglichkeit zur direkten Ansteuerung haben. Dadurch ist es möglich mit den Säulen auch die entwickelten Ladeverfahren anzuwenden, mit dem Nachteil, dass die Fahrzeugbatterien dazu direkt mit der Säule ohne standardisierten Stecker angeschlossen werden müssen, was Umbauzeit erfordert. Auf Grund der eher politischen Verhandlungen zur Erlangung des CCS-Ladeprotokolls verzögert sich der Aufbau der Ladesäulen, sodass innerhalb des Projektes keine Langzeituntersuchungen zu Auswirkungen der Ladeverfahren auf die Lebensdauer der Batterien im realen Einsatz untersucht werden können. Aber zum Ende des Projektes gibt es eine Veröf-

fentlichung vom KIT [5], in welcher beschrieben wird, dass gelegentliche Schnellladungen zu einer Lebensdauererhöhung der Batterie führen und somit Schnellladungen nicht nur schädlich für die Batterie sind. Somit ist zu erwarten, dass auch die hier entwickelten Ladeverfahren nicht zwangsweise bei Langzeitanwendung zu einer Lebensdauererhöhung der Batterie führen, sondern im Gegenteil Lebensdauererhöhend wirken werden.

Ein weiteres, grundlegendes Problem der Schnellladung ist die Bereitstellung einer großen, elektrischen Leistung, um eine Schnellladung durchführen zu können. Dies ist nicht überall und meist nicht bei den Privatleuten zu Hause möglich. Aus diesem Grund kommt der Projektpartner Jochen Schreiber, Betreiber zweier Araltankstellen, hinzu. Tankstellen verfügen, meist für ihre Waschstraßen über einen größeren Stromanschluss, welcher sich zur Versorgung von Schnellladesäulen eignet. Auch wurde das Projekt mit durch die

Fragestellung des Tankstellenbetreibers initiiert, was aus den Tankstellen im Zeitalter der Elektromobilität wird? Eine Antwort kann sein, dass dort Schnellladestationen aufgebaut werden, an welchen das Laden innerhalb von 30 Minuten möglich ist. Ein solches Modell passt auch sehr gut zu dem im Projekt ermittelten Businesscase für Tankstellen, zumal die Tankstellen den Hauptumsatz mit den Shop erzielen [6], wobei längere Aufenthaltszeiten der Kunden sich sehr positiv auswirken können. Im Projekt wurde das Personal der Tankstelle geschult, um mit der Ladesäule umgehen und Elektroautofahrern behilflich sein zu können. In diesem Zusammenhang wird auch der Projektpartner WVI Professor Wermuth Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung tätig, welcher die Auswirkungen auf und die Einbindung der Ladesäulen in die Infrastruktur untersucht.

Insgesamt sind alle Projektziele erreicht worden und das Projekt wurde mehrmals medienwirksam vorgestellt (Abbildung 6).



Abbildung 6: Austausch mit der Bundesministerin Ursula von der Leyen im EFZN in Goslar.

## Literaturverzeichnis

- [1] ADAC: Mobilität in Deutschland, ausgewählte Ergebnisse in Fakten & Argumente kompakt, Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V., Ressort Verkehr, Artikelnummer 2830600, 2010
- [2] Mobilität in Deutschland 2008 (MID 2008), Tabellenband, infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Institut für Verkehrsforschung, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung unter FE-Nr. 70.801/2006, Bonn und Berlin, Februar 2010, PN 3849
- [3] Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2012/2013: Alltagsmobilität und Fahr-

leistungen, INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsprojekt FE-Nr. 70.0864/2011, beauftragt vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Referat UI34, Februar 2014

- [4] Liu, Luo: Search for an Optimal Rapid-Charging Pattern for Li-Ion Batteries Using the Taguchi Approach, IEEE TRANS. ELEC., 57, 2010
- [5] Pressebericht vom KIT mit dem Titel „Mix aus schneller und konventioneller Ladung schont die Batterie“, Presseinformation Nr. 051 | le | 02.05.2014
- [6] Morgenstern, T./ Zimmermann, K.: Branchenstudie Tankstellenmarkt 2011. Deutschland, Ausgabe Nr. 8, Scope Credit Rating, Tübingen 2012

### Projektpartner

#### Projektkoordination

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

#### Externe Partner

- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut Goslar
- Jochen Schreiber (Aral-Tankstellenbetreiber)
- E-Wolf GmbH
- WVI Professor Dr. Wermuth
- Verkehrsforschung und Infrastrukturplanung
- Power Innovation GmbH
- Wolfsburg AG

# Aktive Schwingungsdämpfung in Antriebssträngen mit Planetengetrieben und Beobachtung der Lasteingangsfunktion am Beispiel der Windkraft

## Problem

Windkraftanlagen müssen durch ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und damit Betriebssicherheit gekennzeichnet sein. Fehler am Antriebsstrang der Anlagen sind immer noch ein häufiger Ausfallgrund.

Die im Betrieb auftretenden Lasten und damit die örtlichen Beanspruchungen an den Bauteilen bestehen, neben dem statischen beziehungsweise quasistatischen Anteil, aus einem hohen dynamischen Anteil durch die Windlast sowie Böen und bestimmte Sonderereignisse.

## Ziel

In diesem Vorhaben soll eine zusätzliche Regelung entwickelt werden, um Schwingungen an solchen Antriebssträngen aktiv zu dämpfen. Exemplarisch wird das Beispiel einer Windkraftanlage betrachtet. Der Regler wird so ausgelegt, dass er an verschiedenen gängigen Generatorkonzepten mit feldorientierter Regelung (Synchronmaschine, Asynchronmaschine mit Vollumrichter und doppeltgespeist) anwendbar ist.

Deutlich bessere Ergebnisse sind zu erwarten, wenn die Wellenmomente des Antriebsstrangs bekannt sind, da diese sehr dynamische auf Lastwechsel reagieren. Bei Antriebssträngen mit einem Getriebe mit großer Übersetzung, wie dies in Windkraftanlagen üblich ist, ist es aufwändig, das sehr hohe Moment an der langsam drehenden Welle zuverlässig zu messen. Aus diesem Grund soll in diesem Vorhaben mit einer dynamischen

Beobachtung des Drehmoments gearbeitet werden.

## Stand der Technik

Die aktive Dämpfung von Antriebsschwingungen ist am Institut für Elektrische Energietechnik (IEE) seit langem ein Forschungsthema. Bei Antriebssträngen, die eine elektrische Drehfeldmaschine beinhalten, ist es prinzipiell möglich über die feld-

## Daten zum Projekt

**Verantw. Projektleiter:**  
Dr.-Ing. Dirk Turschner

**Projektkoordinator:**  
Dipl.-Ing. Nikola Ell



Dirk Turschner



Nikola Ell

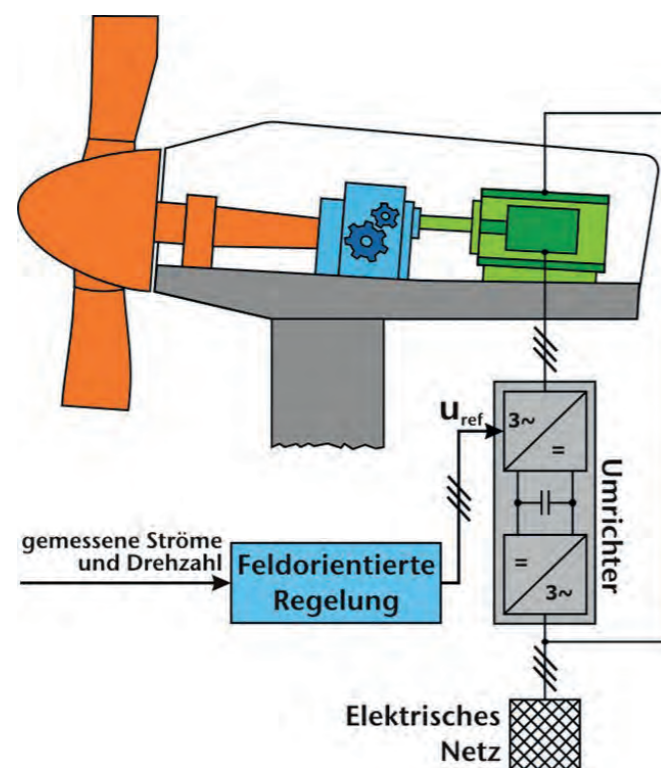


Abbildung 1: Grundsätzlicher Aufbau einer Windkraftanlage mit doppelt gespeister Asynchronmaschine und Getriebe

orientierte Regelung der Maschine eine Dämpfung zu erreichen. Hierbei kann ein Dämpfungseffekt entweder durch Anpassen des bestehenden Regelungskonzepts oder mittels eines zusätzlichen Reglers erreicht werden.

Bei einer Windkraftanlage kann die Schwingungsdämpfung zum einen über die Regelung zur Einstellung des Pitch-Winkels, also durch eine Verstellung des Rotorblatts, oder über die feldorientierte Regelung des Generators erfolgen. Heutzutage wird zur aktiven Schwingungsdämpfung in Windkraftanlagen häufig eine Drehzahl-Vorsteuerung eingesetzt, welche die gemessene Generatordrehzahl rückkoppelt. Auf diese Weise sind bereits gute Ergebnisse im Bereich der Schwin-

gungsdämpfung möglich. Dieses Verfahren dient in diesem Vorhaben als Referenz.

Bei Antriebssträngen, die ein Getriebe mit großer Übersetzung beinhalten, ist es im Besonderen kompliziert die hohen Drehmomente der Antriebswellen zuverlässig zu messen. Es gibt Drehmomentmesswellen, die solche großen Momente messen können, jedoch sind dies aufwändige und teure Sonderanfertigungen und bei rauem Klima störanfällig.

#### Lösungsweg

Der Entwurf von Regler und Beobachtung wird zunächst exemplarisch in einer Simulation durch-

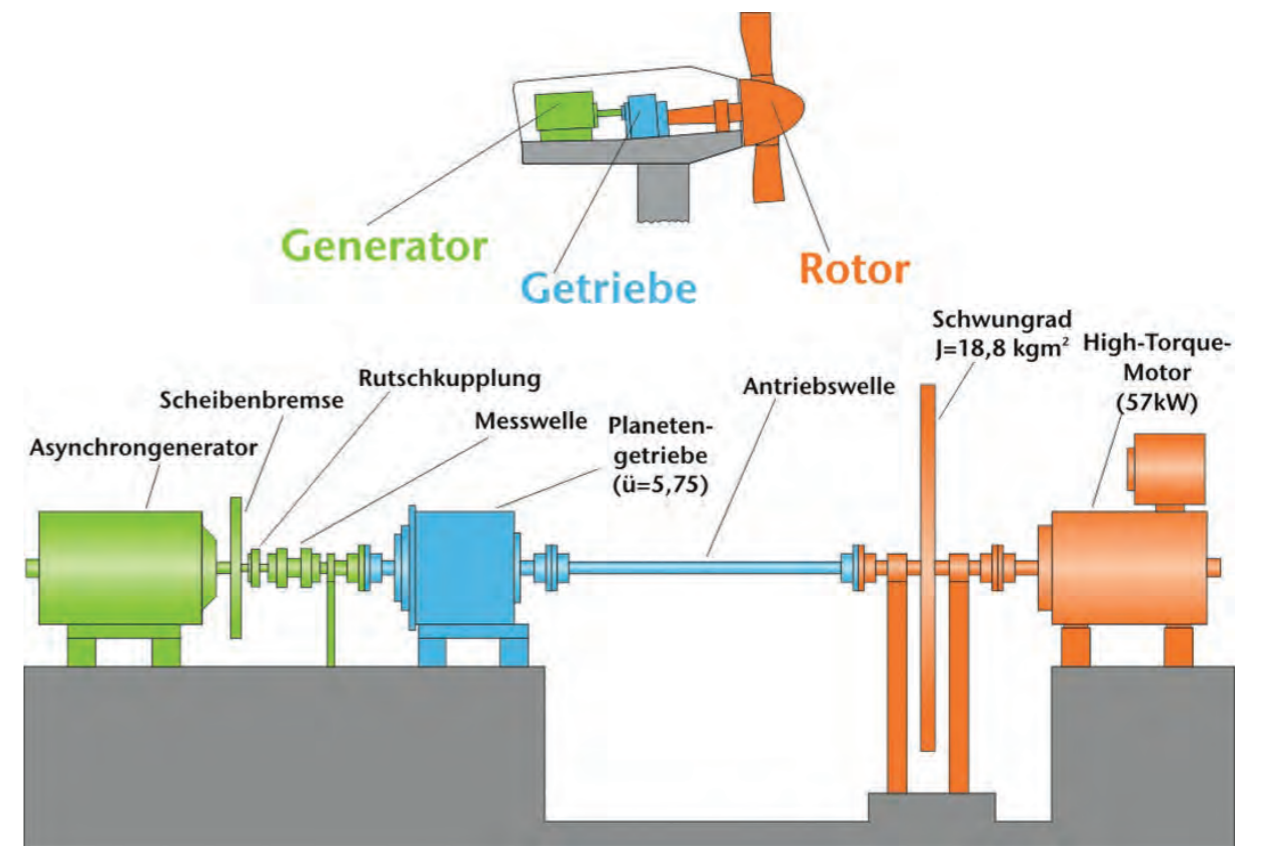


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsstands zur Nachbildung des Antriebsstranges einer Windkraftanlage am IEE

geführt, die Generator, mechanischen Komponenten und die Regelung beinhaltet. Hierzu wird die Software Matlab/Simulink verwendet.

Anschließend sollen die Ergebnisse an einem Versuchsstand validiert werden, der den Antriebsstrang einer Windkraftanlage mit doppelt gespeistem Asynchrongenerator und allen wichtigen mechanischen und elektrischen Bauelementen einer solchen Anlage in kleinerem Maßstab nachbildet. Eine solche Anlage ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt, der Versuchsstand selbst in Abbildung 2. Ein High-Torque Motor dient zur Nachbildung der Windlast.

#### Projektstand

Das für den Regler- und Beobachtungsentwurf benötigte Modell wurde in Matlab/Simulink implementiert und getestet.

Die verfahren zur Beobachtung und zur aktiven Schwingungsdämpfung wurden an dem Modell in Simulationen getestet und zeigen gute Ergebnisse. Hierzu wurde die „Regelung zur Erhöhung der Lebensdauer des Antriebsstrangs“ (RELA) entwickelt, die einen korrigierenden Drehzahl-Sollwert für die Drehzahlregelung ermittelt, der dem ursprünglichen Sollwert überlagert wird und so die Torsionsschwingungen im Antriebsstrang reduziert. Der Regler basiert auf der Idee,

# Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

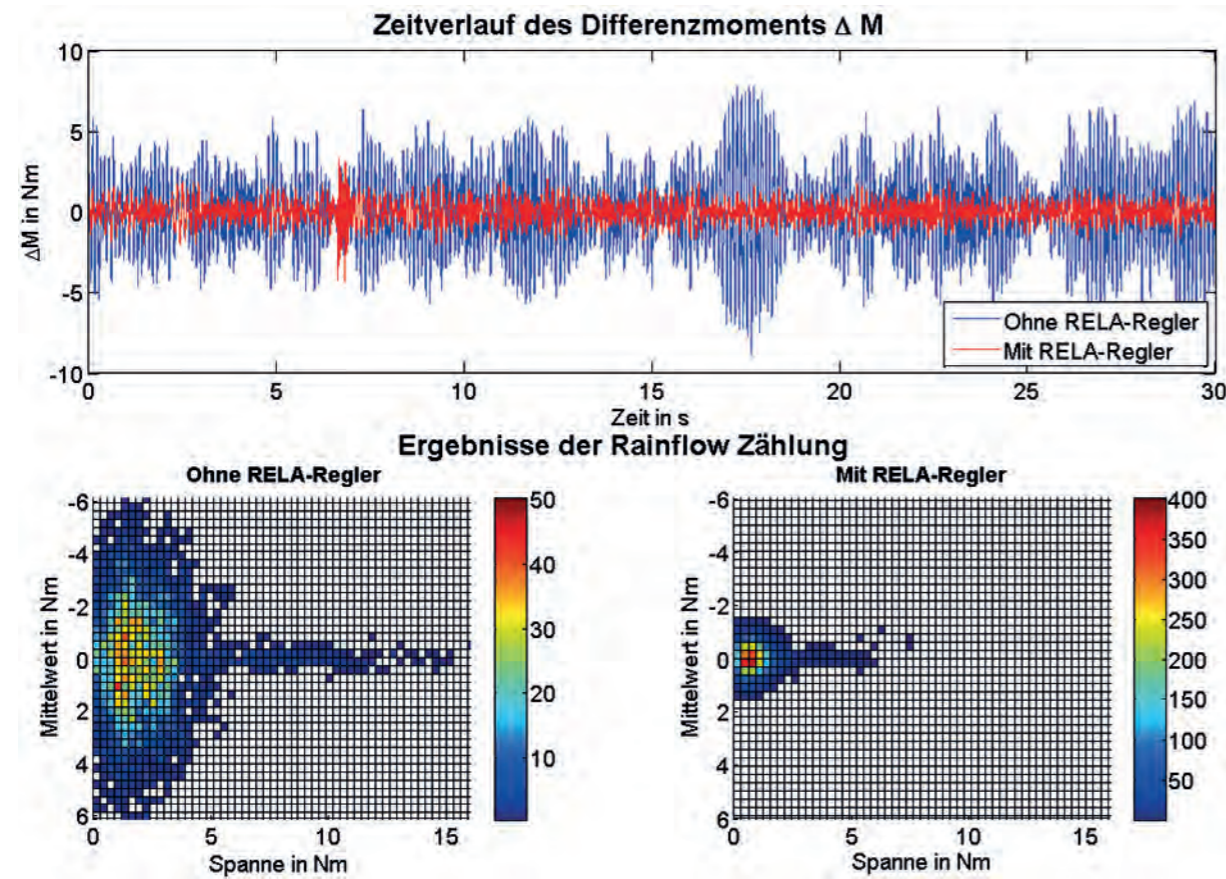


Abbildung 3: Oben: Zeitverlauf des Differenzmoment der Getriebewellen, das das Getriebe belastet, ohne (blau) und mit (rot) der „Regelung zur Erhöhung der Lebensdauer des Antriebsstrangs“ (RELA).

Unten: Ergebnisse der Rainflow Zählung des Differenzmoments mit und ohne RELA-Regler. Farblich dargestellt sind die Anzahl der Schwingungen mit dem jeweiligen Wert.

dass durch Ausregeln der Drehbeschleunigung die Belastung durch Schwingungen reduziert werden kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass auf diese Weise eine aktive Dämpfung von Schwingungen im Antriebsstrang sehr gut möglich ist. In Abbildung 3 ist das Differenzmoment der Getriebewellen über der Zeit dargestellt. Diese Differenz belastet das Getriebe und sämtliche Antriebsselemente. Der blaue Verlauf zeigt das Verhalten ohne, der rote

das mit RELA-Regelung. Darunter sind die mit einer Rainflow-Zählung ermittelten Lastkollektive in beiden Fällen dargestellt. Die reduzierte Schwingungsbelastung am Antriebsstrang ist deutlich erkennbar.

Der Umbau des Versuchsstands wurde abgeschlossen, zurzeit erfolgt die Inbetriebnahme. In einem nächsten Schritt werden dann die entwickelten Konzepte am Versuchsstand implementiert und dort getestet.

## Problem

Prozessbedingte Abwärme in verschiedenen energieintensiven Prozessen, wie in der Stahl- und Glasherstellung sowie in Großbäckereien bleibt häufig ungenutzt und geht an die Umgebung verloren. Mit Thermogeneratoren lässt sich Wärme direkt in elektrische Energie umwandeln. Thermoelektrische Abwärmenutzung könnte den Primärenergieverbrauch senken, und damit signifikant zum Klimaschutz beitragen.

## Ziel

In diesem Projekt soll der Gesamtwirkungsgrad der thermoelektrischen Abwärmenutzung mit

verfügbaren Komponenten unter realistischen Bedingungen ermittelt und verbessert werden.

Hierzu soll ein Mehrkammer-Kalorimeter aufgebaut werden um den thermischen Wirkungsgrad der Wandlung zu messen. Die Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrads soll durch einen angepassten Umrichter mit Maximum Power Point Tracking (MPPT) erreicht werden. Im Rahmen des Projektes soll exemplarisch eine Schaltung entwickelt werden, die Leistung von Thermogeneratoren, betrieben in unterschiedlichen Temperaturdifferenzen, in eine maximale elektrische Ausgangsleistung umwandelt. Außerdem wird das langfristige Ziel verfolgt, thermoelektrische Hochtemperatur-Generatoren zu entwickeln. Auf

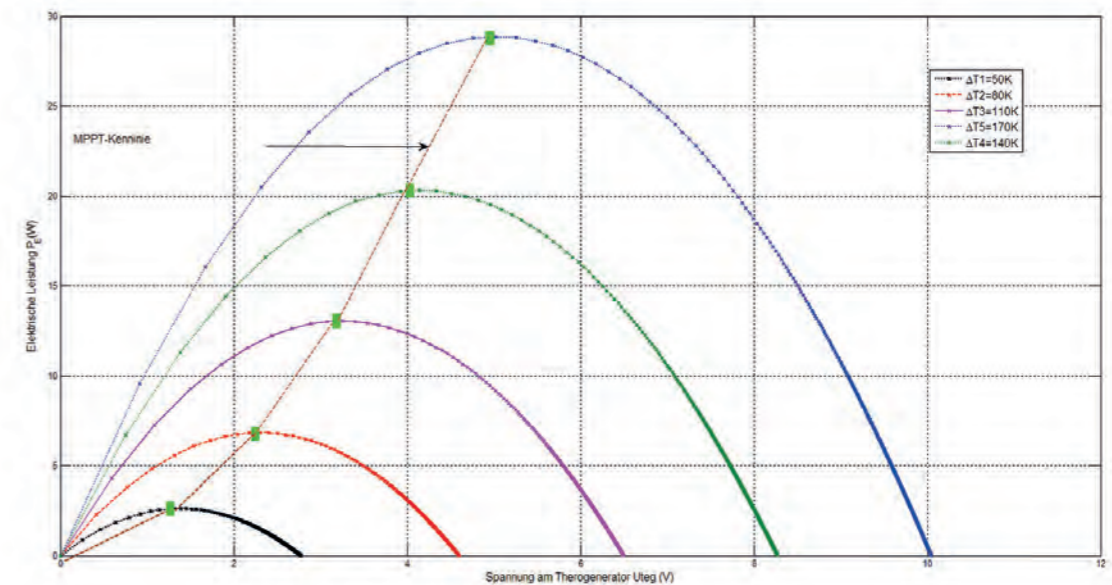


Abbildung 1: berechnete Leistungskennlinie des verwendeten Thermogenerators bei unterschiedlichen Temperaturdifferenzen

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen (Thermoelektrik)

### Fördernde Stelle:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

### Förderkennzeichen:

BE 1496/16-1; BE 1496/16-2 (Fortsetzungsvorhaben)

### Laufzeit des Vorhabens:

01.09.2011 bis 28.02.2016

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Projektkoordinator:

Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb

E-Mail: abdelhamid.bentaleb@tu-clausthal.de



Hans-Peter Beck



Abdelhamid Bentaleb

Grund höherer Temperaturdifferenzen steigen die Carnot-Wirkungsgrade und damit auch der Wirkungsgrad der TE-Konversion. Konventionelle Lotverbindungen können den häufigen Temperaturwechseln nur eingeschränkt standhalten. Gerade bei höheren Temperaturdifferenzen muss daher eine neuartige Drucksinterverbindungstechnik mit deutlich verbesserter Temperaturwechselfestigkeit zum Einsatz kommen.

### Stand der Technik

Die am häufigsten verwendeten Materialien für Thermogeneratoren sind die Bismutellurid-Verbindungen. Fast alle kommerziell verfügbaren Thermogeneratoren sind aus diesen Halbleitern aufgebaut. Der erreichte ZT-Wert (Effektivitätszahl) liegt bei circa 1 zwischen Raumtemperatur und 100 Grad Celsius. Ein wesentlicher Aspekt thermoelektrischer Energiewandlung ist die Tatsache, dass der Wirkungsgrad nicht nur mit Eigenschaften des Halbleiters selbst, sondern vor allem mit dem thermodynamischen Carnot-Wirkungsgrad skaliert. Ist der Carnot-Wirkungsgrad klein (also bei niedrigen Temperatur-Differenzen), dann ist auch der thermoelektrische Wirkungsgrad klein. Dieser Zusammenhang wird oft unzureichend diskutiert. Akzeptable Wirkungsgrade sind nur mit hohen Temperatur-Differenzen erreichbar. Hier stoßen aber viele TE-Module an ihre Grenzen. Meist sind die konventionellen TE-Materialien nur bei Temperaturen unterhalb von circa 250 Grad Celsius einsetzbar, und die verwendete Aufbautechnik beruht auf konventioneller Lot-Technik und begrenzt daher zusätzlich den zugänglichen Temperaturbereich. Temperaturwechselbelastungen, welchen TE-Module in besonderer Weise ausgesetzt sind, führen häufig zum Ausfall, beispielsweise durch Adhäsionsbruch der Lot-Metallisierung am Halbleiter.

Da die Ausgangsspannung der thermoelektrischen Module mit der Temperaturdifferenz schwankt, ist es notwendig eine Übertragerschaltung zur Leistungsanpassung zwischen TEG und Verbraucher einzusetzen (die simulierte Leistungskennlinie eines Thermogenerators ist in Abbildung 1 dargestellt). Ein wichtiger Designfaktor der TEG-Schal-

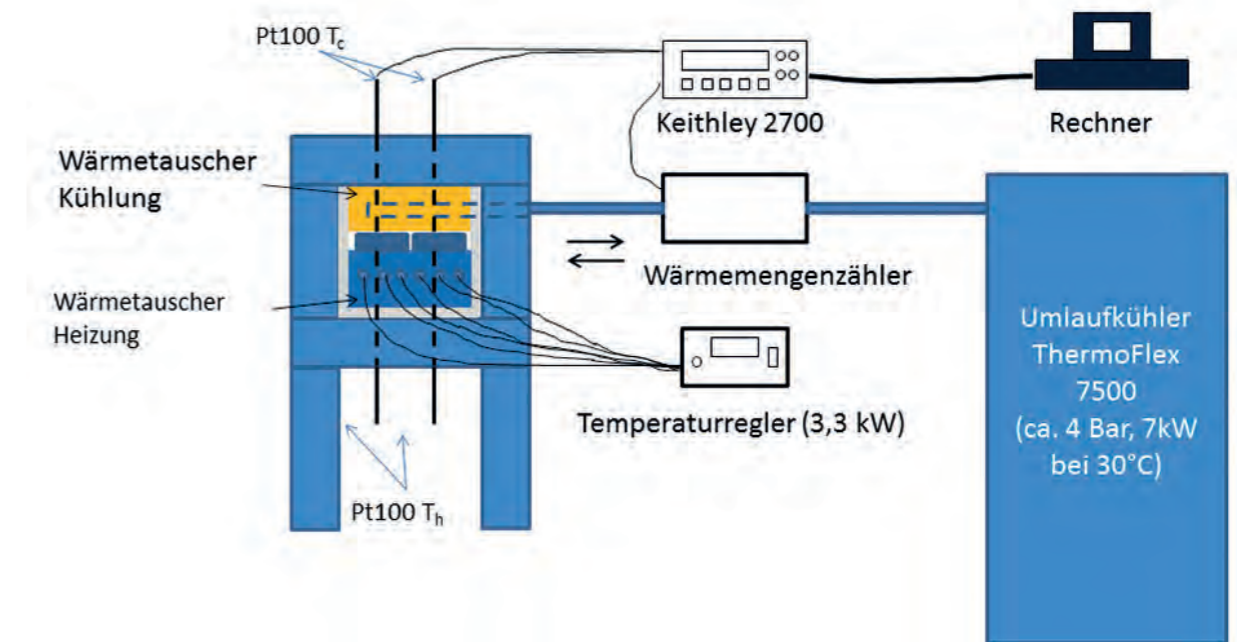


Abbildung 2: Schematischer Aufbau Kalorimeter

tung ist die Anordnung der thermoelektrischen Module. Da für Leistungsanwendungen mehr als ein Modul verwendet werden muss, können die Module in Serie, parallel oder gemischt in seriellen oder parallelen Ketten angeordnet werden.

Für das Schaltungsdesign und die Modulanordnung lassen sich aus anderen Bereichen der elektrischen Energietechnik vorhandene Erfahrungen nutzen. So sind Erfahrungen aus dem Bereich der Photovoltaik und der Brennstoffzelle hier von Nutzen, weil hier ebenfalls zahlreiche Zellen in Gruppenschaltung zur Leistungsanpassung erforderlich sind. Die Verschaltung vieler thermoelektrischer Module hat aber den Nachteil dass die wirksame Temperaturdifferenz ist nicht an allen Modulen gleich ist, was zu unterschiedlicher Leistung und innerem Widerstand und damit zur Fehlanpassung führt. Hier soll ein sogenannter „distributed MPPT“ erforscht werden.

Die Effizienz von elektronischen Spannungswandlern konnte in den letzten Jahren durch Miniaturisierung und Bauelementintegration immer weiter gesteigert werden. Darüber hinaus trug die Reduktion des Durchlasswiderstands von Leistungshalbleitern zur Verbesserung bei. Hier sind weitere Verbesserungen zum Beispiel durch aktive Kompensation von Schaltverlusten zu erforschen.

### Lösungsweg

Für die Entwicklung der Hochtemperaturgeneratoren wird eine neue Verbindungstechnik erprobt. Es handelt sich dabei um ein Versintern einer nanoporösen Silber-Zwischenschicht bei relativ niedrigen Temperaturen von circa 250 Grad Celsius und Drücken bis zu 30 MPa. Es ergibt sich eine kompaktierte Silber-Schicht zwischen zwei Verbundpartnern, die hervorragende elektroni-

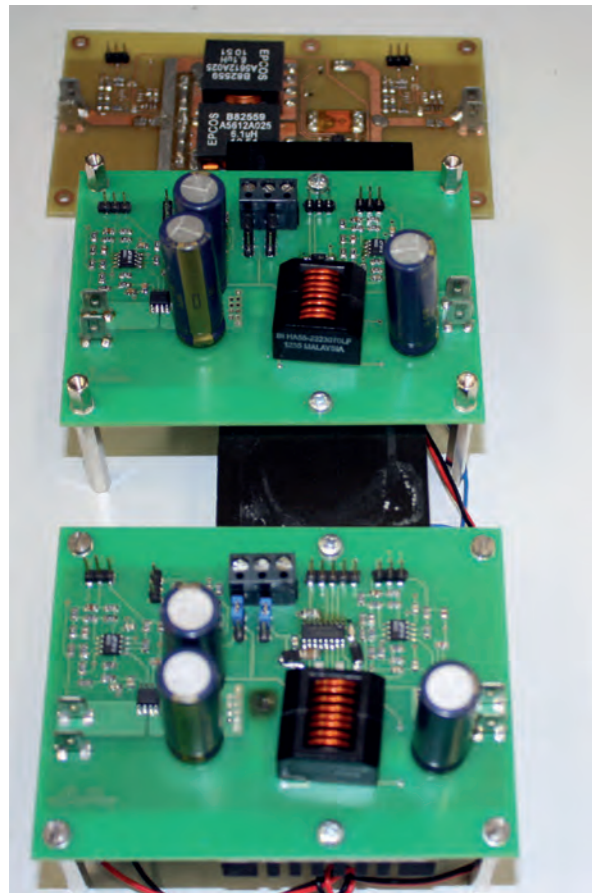


Abbildung 3: (links) Zweiphasiger Hochsetzsteller Synchronwandler, (Mitte) Tief-/Hochsetzsteller als Vollbrücke, (rechts) Tief-/Hochsetzsteller als Vollbrücke mit anderer Treiberschaltung und einstellbarer Totzeit

sche, thermische und mechanische Eigenschaften aufweist und mittlerweile auch als Lot-Ersatz in der Produktion von Leistungselektronik-Bauelementen angewandt wird. Da der Schmelzpunkt von Silber bei über 900 Grad Celsius liegt, kann die Verbindung auch oberhalb der Prozesstemperatur von 250 Grad Celsius eingesetzt werden.

Für die Energiekonditionierung wird ein effizienter Wandler (Tief-/Hochsetzsteller) entwickelt.

Es werden Aspekte zur Wirkungsgardsteigerung (zum Beispiel aktive Kompensation von Verlusten, Auslegung und Dimensionierung von Bauelementen, mehrphasige Schaltung) untersucht. Für eine maximale Energieausbeute wird auch ein maximaler dynamischer MPPT-Wirkungsgrad angestrebt und dafür ein stabiler Regelalgorithmus des Wandlers entworfen und erprobt.

Um verschiedene Versuchsreihen durchzuführen, ist es nötig eine genau kontrollierte Temperaturdifferenz an die Module anzulegen. Dafür wird ein Mehrkammerkalorimeter mit Wärmequelle, Modulnetzwerk, Wärmesenke und entsprechender Messtechnik aufgebaut.

Damit wird es möglich, den Wärmefluss in den Thermogenerator, die Temperaturdifferenz und die aus dem System fließende Wärmemenge zu messen. So lässt sich der Wirkungsgrad der Thermogeneratoren bestimmen.

### Projektstand

Für die Versuchsdurchführungen wurde ein Mehrkammerkalorimeter aufgebaut, mit dem unterschiedliche Temperaturdifferenzen eingestellt werden können und die ein- und abfließende Wärmemenge genau gemessen werden kann. Der Aufbau einer Kammer ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Für die Energiekonditionierung wurde ein DC/DC Wandler in verschiedenen Topologien zum Vergleich und Optimierung realisiert. Abbildung 3 zeigt die Schemadarstellung der Bauteile von drei erprobten Schaltungen.

Der Zweiphasige Synchronwandler hat sich für eine Nennleistung von 70W pro Thermogenerator-Einheit bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen ( $\Delta T = T_h - T_c = 50K \dots 200K$ ) als das energieeffizienteste Schaltungskonzept ergeben.

In Tabelle 1 ist der gemessene Wirkungsgrad des Wandlers für unterschiedliche Eingangsleistungen aufgeführt.

Tabelle 1:

P_Eingang (W)	30	40	50	60	70	80	90
Wirkungsgrad (%)	96,41	96,47	96,96	97,11	97,21	97,1	97,04

Für die Regelung wurden unterschiedliche MPP-Tracking Verfahren entwickelt und implementiert. Die Einstellung des Arbeitspunktes kann über eine modellbasierte Berechnung aus der gemessenen Temperaturdifferenz oder über die Verfolgung des Leistungsgradienten über die Zeit erfolgen. Die Schrittweite mit der sich das Tastverhältnis des Wandlers ändert kann auch variabel eingestellt werden um eine bessere Dynamik bei einem Lastwechsel zu erhalten. Abbildung 4 zeigt der

gemessene dynamische MPPT-Wirkungsgrad bei zwei erprobten MPPT-Verfahren.

Das in dem Mehrkammerkalorimeter aufgebaute Netzwerk aus 12 Thermogeneratoren wurde am Eingang des entwickelten Wandlers (mit MPPT-Regelung) angeschlossen. Es ergibt sich eine elektrische Ausgangsleistung von circa 136 W bei einer Temperaturdifferenz von 200 K.

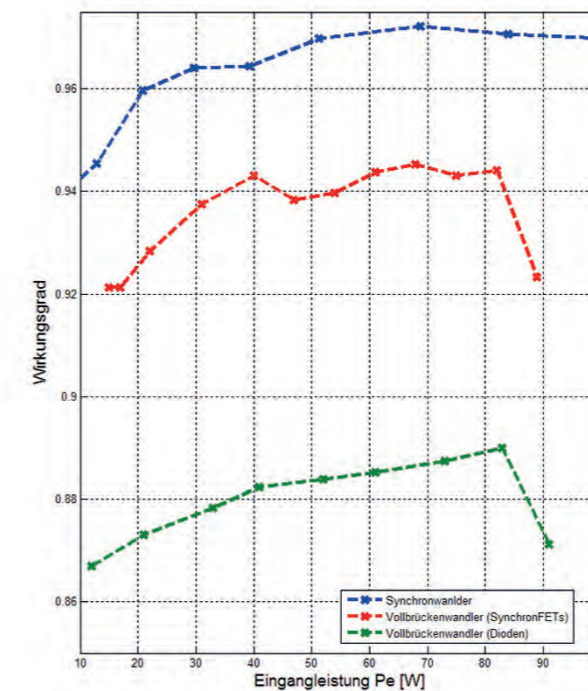


Abbildung 4: Dynamischer MPPT-Wirkungsgrad des Wandlers bei einem Lastwechsel

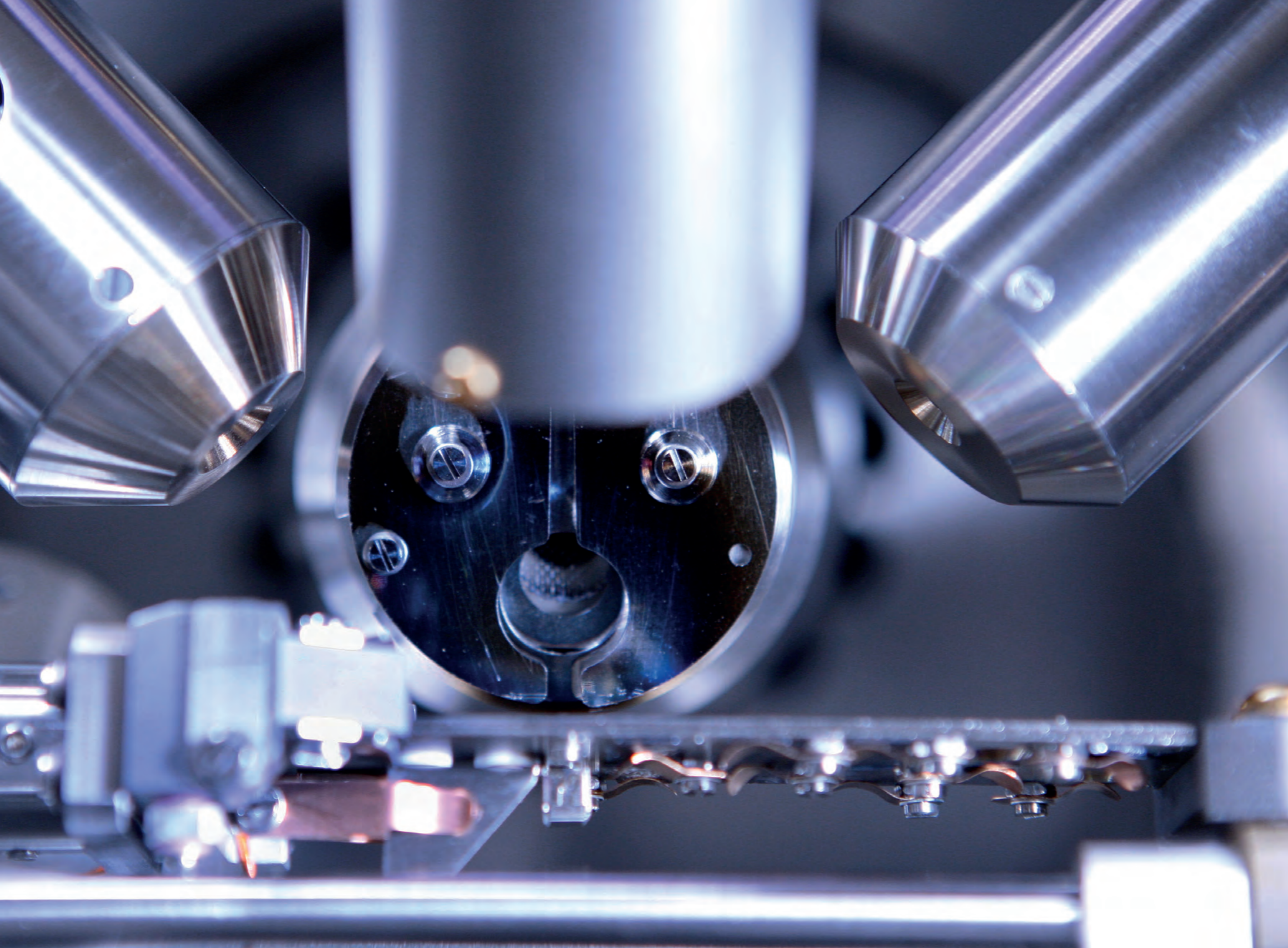
### Projektpartner

#### Projektkoordination

- Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

#### Beteiligte Institute

- Institut für Halbleitertechnik, TU Braunschweig
- Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, TU Clausthal



Weiterentwicklung  
zum gemeinsamen  
wissenschaftlichen  
Zentrum und  
Vorstellung  
der Energie-  
forschungsknoten

4



## Die neue Struktur des EFZN ab 01.01.2016 als gemeinsames wissenschaftliches Zentrum der Universitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg

Das EFZN wurde auf Basis eines durch die Niedersächsische Landesregierung genehmigten Antrags und ursprünglicher Satzung vom 12. Dezember 2006 als „wissenschaftliche Einrichtung der TU Clausthal und in Kooperation mit den Universitäten Braunschweig, Göttingen, Hannover und Oldenburg“ gegründet. Hinsichtlich einer organisatorischen Weiterentwicklung wurde bereits in § 1 Absatz 2 der Satzung aus dem Jahr 2006 festgelegt, dass „die Kooperationspartner des Forschungsverbundes sich darüber einig sind, dass das EFZN mittelfristig in eine Gemeinsame Einrichtung der beteiligten Hochschulen fortentwickelt werden soll“. Bereits Ende Oktober 2010 hat der EFZN-Vorstand daher gemeinsam mit dem Kuratoriumsvorsitzenden eine „AG Organisationsweiterentwicklung“ gebildet und dabei schrittweise Eckpunkte für die weiteren Diskussionen mit den Präsidien der Kooperationshochschulen und dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) entwickelt. Diese Eckpunkte sind in die „Rahmenvereinbarung zum Betrieb des gemeinsamen wissenschaftlichen Zentrums Energie-Forschungszentrum Niedersachsen“ (Rahmenvereinbarung) aufgenommen worden, die am 16.06.2015 durch die Unterschriften aller Präsidentinnen und Präsidenten der EFZN-Kooperationshochschulen in Kraft getreten ist.

Das EFZN ist danach nunmehr ein gemeinsames wissenschaftliches Zentrum der Universitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg. Es wird seit Oktober 2015 von einem paritätisch besetzten Vorstand (je ein Mitglied pro Vertragspartner) geleitet, der bei der Führung der laufenden Geschäfte durch die ge-

meinsame Geschäftsstelle in Goslar unterstützt wird. Um die kontinuierliche Abstimmung mit den Präsidien der Kooperationshochschulen und dem MWK zu Angelegenheiten von grundsätzlicher Bedeutung (unter anderem Ausrichtung einer standortübergreifenden, niedersächsischen Forschungsstrategie; Haushalts- und Budgetplanung der Landesmittel des EFZN) zu gewährleisten, wurde ein Aufsichtsrat eingeführt. Zur Beratung des Vorstands in allen wissenschaftlichen und organisatorischen Fragen wird zudem ein Wissenschaftlicher Beirat durch den Aufsichtsrat benannt.

Mit der Zielsetzung, auch die niedersächsische Energieforschung als Ganzes national und international besser zu positionieren, sollen im EFZN laut Rahmenvereinbarung zukünftig insbesondere folgende Aufgaben wahrgenommen werden:

- Initiierung und Durchführung gemeinsamer, vorrangig standortübergreifender Drittmittelprojekte
- Strategische Abstimmung einer gemeinsamen Energieforschungsstrategie im Land Niedersachsen
- Überregionales und internationales Marketing für die niedersächsische Energieforschung
- Vorhalten zentraler Forschungsinfrastruktur, zum Beispiel Batterie- und Sensoriktestzentrum in Goslar und Drilling-Simulator Celle

Zentrales Fundament einer weiterentwickelten Kooperation der fünf beteiligten Universitätsstandorte ist ein systemischer, transdisziplinärer Forschungsansatz und darauf aufbauend die Entwicklung eines gemeinsamen, inhaltlichen Leit-



Die Vorstandsmitglieder und Sprecher der jeweiligen Energieforschungsknoten: Reihe oben v. li. die Professoren Carsten Agert (Oldenburg), Axel Mertens (Hannover) und Michael Kurrat (Braunschweig); Reihe unten v. li. Professor Jutta Geldermann (Göttingen) und Professor Hans-Peter Beck (Clausthal).

bildes, das unter dem Dach des EFZN auch auf dem Sektor der niedersächsischen Energieforschung zukünftig profilbildend sein soll. Die Kooperationspartner errichten dazu laut Rahmenvereinbarung an ihren jeweiligen Standorten gleichberechtigte „Energieforschungsknoten“ unter Heraushebung eigener Forschungsschwerpunkte (siehe Darstellung im Folgenden), die im EFZN zu einer gemeinsamen Energieforschungsstrategie abgestimmt und zusammengeführt werden. Dazu wurde zunächst für jeden der fünf

beteiligten „Energieforschungsknoten“ (inneruniversitäre, fachübergreifende Forschungsverbünde) ein eigenes Standortprofil nach folgenden Hauptkriterien entwickelt: Systemrelevanz und wissenschaftlicher Mehrwert bei der Energiewende, Relevanz für Wirtschaft und Gesellschaft, Synergie- und Kooperationspotenzial zwischen den EFZN-Standorten unter Zugrundelegung vorhandener, quantitativer und qualitativer Expertise aus Natur-, Technik- sowie Geistes-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.

# Energieforschungsknoten der Technischen Universität Braunschweig

## Organisation

Der Energieforschungsknoten Braunschweig (EFK BS) beinhaltet 26 Institute verschiedener Disziplinen aus 5 Fakultäten der TU Braunschweig in Kooperation mit dem Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF), der Battery LabFactory Braunschweig (BLB), dem Laboratory of Emerging Nanometrology (LENA), sowie der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB). Zusammen wird die Wertschöpfungskette der Energieerzeugung, des Energietransports sowie der Energienutzung forschungstechnisch aufgenommen. Innerhalb des EFK BS existiert ein Sprecherteam aus drei Professoren (Professor Michael Kurrat, Professor Frank Eggert, Professor Ulrike Krewer) als übergeordnetes Entscheidungsgremium.

Darüber hinaus existiert eine Koordinationseinheit in Form von zwei Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen (Dipl.-Ing. Fridolin Muuß, Dipl.-Ing. Hauke Loges), welche sämtliche Koordination im EFK BS übernehmen (Terminkoordination, Protokollierung, Kommunikation zu Partnern, Koordination bei Anträgen). Zusammen mit den Mitgliedern des EFK in Form von Professoren und Mitarbeitern stellen diese derzeit den Kern des EFK BS dar.

## Forschungsthemen

Die Forschungsthemen des EFK Braunschweig sind in der unten dargestellten Grafik abgebildet. Diese werden jeweils durch mehrere Mitglieds-

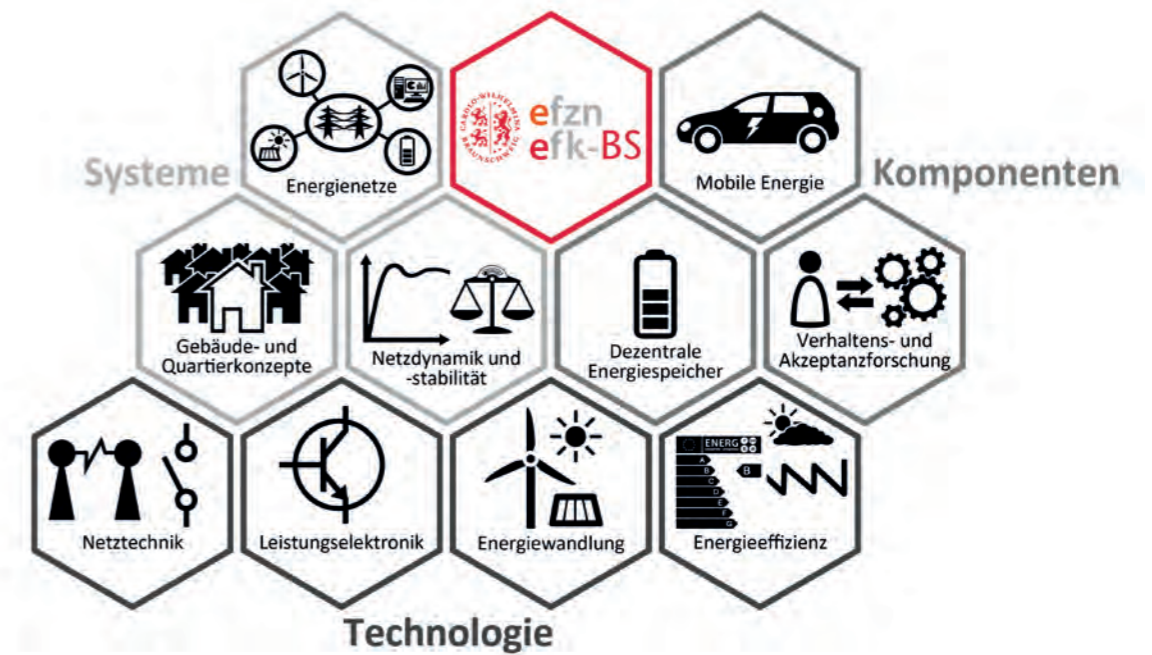


Abbildung 1: Forschungsthemen im EFK Braunschweig.

institute und Mitarbeiter/innen in verschiedenen Forschungsprojekten bearbeitet.

Die Forschungsschwerpunkte innerhalb des EFK sind dabei so aufgestellt, dass Beiträge zur Energiewertschöpfungs- und Energienutzungskette der Zukunft geleistet werden können. Ziel des EFK BS ist es, sich innerhalb der Themengebiete „Intelligente dezentrale Energiesysteme und Speicher“ stärker aufzustellen. Das Motto „klein, skalierbar, intelligent“ wird dabei als Leitbild für zukünftige Projekte verwendet. Bereits heute engagiert sich der EFK BS innerhalb von zwei interdisziplinären EFK-Projekten („NEDS“ und „SmartNord-iQ“). Zukünftig strebt der EFK Braunschweig weitere standortübergreifende Verbundprojekte mit Partnern anderer EFK an.

Ansprechpartner für Koordination/Clustermanagement des EFK und für die Unterstützung der gemeinsamen Verbundforschung im EFZN sind Dipl.-Ing. Hauke Loges, und Dipl.-Ing. Fridolin Muuß.

## Daten zum Forschungsknoten

**Bezeichnung:** Energieforschungsknoten Braunschweig (EFK BS)

**Sprecher/in:**  
Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat  
Prof. Dr. Frank Eggert  
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer

**Ansprechpartner/Koordination:**  
Dipl.-Ing. Hauke Loges,  
hauke.loges@tu-braunschweig.de  
Dipl.-Ing. Fridolin Muuß,  
f.muuss@tu-braunschweig.de



# Energieforschungsknoten der Technischen Universität Clausthal

## Organisation

Das Energie-Forschungszentrum der TU Clausthal (EFZ TUC) wurde im Oktober 2005 als wissenschaftlicher Forschungsverbund gegründet mit dem Ziel, die anwendungsorientierte Grundlagenforschung im Bereich Energie und Rohstoffe zu bündeln und auszubauen, um zukünftig eine neue Disziplin „Energiewissenschaft“ in Forschung und Lehre zu etablieren. Gemeinsam mit den außeruniversitären Partnern CUTEC, Fraunhofer HHI-FS und LIAG können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der TU mit den vorhandenen Kompetenzen in Forschung und Lehre auf den Gebieten Energie, Rohstoffe und Material, insbesondere in den Fachgebieten „Geotechnik“, „Bergbau, Erdöl- und Erdgastechnik“, „Energieverfahrenstechnik“, „Chemische Technologien und Batterien“, „Energiesysteme“ „Energiewirtschaft“

und „Energerecht“, „Geoinformatik“ und „Energie- und Materialphysik“, substanzielle Beiträge für die Energieforschung liefern, da in diesen Bereichen das Wissen und die Wissensgenerierung für die aus heutiger Sicht relevanten Bereiche des bestehenden Energiesystems in Forschung und Lehre mit circa 20 Professorinnen/Professoren und 200 Mitarbeiter/innen abgebildet werden. Bis zum 31.12.2015 waren die Aktivitäten des EFZ und des EFZN weitgehend identisch.

## Forschungsthemen

Mit der geplanten strategischen Zusammenarbeit über das etablierte EFZ der TU Clausthal soll die bereits ausgeprägte Kompetenz im Bereich nachhaltiger Energiesysteme (Energiespeicher und -systeme) konsolidiert und ausgebaut werden. Dem EFZ kommt dabei die Rolle zu, die durch die



## Energieforschung am Standort Clausthal/Goslar

Materialien/Stoffe	Systeme	Rahmenbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensorik für Energieanlagen</li> <li>• Batterien / Zellen / Module</li> <li>• Untergrund-Energiespeicher</li> <li>• Tiefbohrtechnik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energieverfahrenstechnik (Prozessenergie)</li> <li>• Power to X X: chemicals, gas, liquid, heat, steel, mobility, etc.</li> <li>• Aktive Verteilnetze mit Systemdienstleistungsfunktionen</li> <li>• H2/X -Speicherkraftwerke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energerecht</li> <li>• Energiewirtschaft VWL, BWL</li> <li>• Energieszenarien</li> <li>• Akzeptanz</li> </ul>



Abb. Zukünftige Energieclusterbildung zu den Standorten Clausthal/Goslar (vgl. Ziel-/Leistungsvereinbarung, 2015)

fachliche Breite der beteiligten Lehrstühle angelegten Denk- und Arbeitsprozesse zu konsolidieren und gemäß des im Masterplan der TUC und in der daraus abgeleiteten Ziel- und Leistungsvereinbarung festgelegten Schwerpunktes „Nachhaltige Energiesysteme“ mit dem Forschungsthema „Regenerative Speicherkraftwerke“ anhand strategiebildender Verbundprojekte weiter auszubauen. Mittelfristige Forschungsschwerpunkte sollen dabei die Themenfelder: Sicherheit geologischer und geotechnischer Systeme, Power to X und Wasserstoff-Speicherkraftwerke mit der dazugehörigen Systemtechnik sein.

Mit der etablierten Zusammenarbeit im EFZ der TU Clausthal, welche mit der vom TUC-Präsidium genehmigten Ziel- und Leistungsvereinbarung festgelegt wurde, wird in Zukunft neben der Bearbeitung von Themenstellungen der Grundlagenforschung (Energie- und Materialwissenschaft) auch die anwendungsorientierte Grundlagenforschung entlang der Energiewertschöpfungskette im EFZN-Verbund ermöglicht.

## Daten zum Forschungsknoten

**Bezeichnung:**  
Energie-Forschungszentrum der TU Clausthal (EFZ TUC)

**Sprecher:**  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck  
Prof. Dr. Leonhard Ganzer  
Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Schade

**Ansprechpartner/Koordination:**  
Dr. Jens-Peter Springmann,  
jpspringmann@tu-clausthal.de



# Energieforschungsknoten der Georg-August-Universität Göttingen

## Organisation des Energieforschungsknotens

Energieforschung wird in Göttingen als Grundlagenforschung in den Bereichen Energietransformation an Oberflächen, Nachwachsende Rohstoffe sowie Geo- und Gesellschaftswissenschaften betrieben. Die Energieforschung in den jeweiligen Disziplinen ist eingebettet in die Instituts- und Fakultätsstrukturen sowie die Verbundprojekte eines Graduiertenkollegs und Sonderforschungsbereichs. Die Göttinger Energieforschung soll durch eine Vernetzung im EFZN gebündelt werden und komplementär die Energiefragestellungen des EFZN auf der Seite der Grundlagenwissenschaften ergänzen.

## Forschungsthemen des Energieforschungsknotens

Die Forschungsthemen der Göttinger Energieforschung ergeben sich aus den langjährigen Aktivitäten in den unterschiedlichen Einrichtungen am Standort. Sie leisten individuelle Beiträge zur Energieforschung und sollen die angewandten Fragestellungen im EFZN von Seiten der Grundlagenforschung mit einem breiten Themen- und Methodenspektrum individuell anknüpfen und ergänzen. Es ist keine thematische Bündelung der individuellen Göttinger Vorhaben zur Energieforschung geplant.

Im Bereich der Molekül- und Materialwissenschaften werden Energiekonversionsprozesse und dynamische Prozesse an Oberflächen auf molekularer Ebene untersucht. Federführend für diesen Bereich vertritt Professor Alec Wodtke (Humboldt Professor an der Fakultät für Chemie und dem MPI für biophysikalische Chemie) die Chemie der Oberflächenprozesse in Hinblick

unter anderem auf die Gebiete der heterogenen Katalyse und Photokatalyse, Photovoltaik sowie Brennstoffzellen. Im Zentrum seiner Forschung steht die Untersuchung der Energiekonversion an Oberflächen mit Methoden modernster Laser-, Molekularstrahl- und Ultrahochvakuum-Technologien. Diese Forschung ist eingebettet in das International Center for Advanced Studies of Energy Conversion (ICASEC) sowie den DFG-Sonderforschungsbereich (SFB 1073) „Atomic scale control of energy conversion“, der unter Sprecherschaft von Professor Christian Joos Arbeitsgruppen aus den Fakultäten Chemie und Physik zur Frage der Energiekonversion vereint.

Die energetische Nutzung nachwachsender landwirtschaftlicher und forstlicher Rohstoffe erfordert die Berücksichtigung und Einhaltung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Standards. Am Beispiel der landwirtschaftlichen Nutzpflanze Zuckerrübe wird im Institut für Zuckerrübenforschung an der Universität Göttingen unter Leitung von Professor Bernward Märländer deren Potential zur Energiegewinnung untersucht, um die starke Fokussierung auf Mais, dessen regional hohe Anbaukonzentration ökologische Nachteile birgt und eine oft nur geringe gesellschaftliche Akzeptanz hat, zu überwinden. Aus der Bewertung des Leistungspotenzials von Zuckerrüben für die energetische Nutzung sollen spezifische Zuchtziele abgeleitet werden. Anforderungen an das Produktionssystem, einschließlich betriebswirtschaftlicher Gesichtspunkte werden ermittelt sowie eine Technikfolgenabschätzung unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung durchgeführt. Weitere Beteiligte an diesem Forschungsschwerpunkt sind Professor Ludwig Theuvsen (Fakultät für Agrarwissenschaften), Professor Johannes Isselstein (Zentrum für Biodiversität und Nachhaltige Land-

nutzung) sowie Professor Hans Ruppert vom Interdisziplinären Zentrum für Nachhaltige Entwicklung und Professor Norbert Lamersdorf (Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie). Die ganzheitliche Herangehensweise hat zum Ziel, Handlungsempfehlungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung des Biomasseanbaus zu formulieren. Bei diesem Vorhaben ergeben sich sehr gute Vernetzungsmöglichkeiten für die beteiligten Arbeitsgruppen mit produktionstechnischem, ökonomischem und ökologischem Bezug.

Die Energieforschung im Bereich der Hydrogeologie von Georeservoirien wird von Professor Martin Sauter (Fakultät für Geowissenschaften und Geographie) koordiniert. In der angewandten Geologie werden Strömungs-, Wärme-, Stofftransport- sowie geomechanische Prozesse in tiefen Georeservoirien untersucht mit dem Ziel, deren Speichervermögen für Fluide (Kohlenwasserstoffe, CO<sub>2</sub>, et cetera) sowie deren Energieinhalt (Wärme) zu quantifizieren und zukünftige Systemzustände unter operativen Nutzungsbedingungen zu prognostizieren. In diesem Zusammenhang soll eine großskalige Triaxialpresse zur Untersuchung des Verhaltens von großskaligen geklüfteten Gesteinsproben unter Reservoirbedingungen (bis 200 Grad Celsius, 120 MPa) betrieben werden; der entsprechende Großgeräteantrag (Investitionsvolumen circa zwei Millionen Euro) ist derzeit in der Entscheidungsphase.

Unter dem Begriff „gesellschaftswissenschaftliche Energieforschung“ kann die Querschnittsforschung aus den Bereichen Wirtschafts-, Sozial- und Rechtswissenschaften zusammengefasst werden. Ein thematischer Schwerpunkt der Göttinger Wissenschaftler ist die interdisziplinäre Erforschung dezentraler Energieerzeugung aus regenerativen Quellen, wie es im DFG-Graduiertenkolleg 1703: „Ressourceneffizienz in Unternehmensnetzwerken“ unter Sprecherschaft von Professor Jutta Geldermann (Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät) deutlich wird. Potenziale für Verbundprojekte im EFZN werden aufgrund der Komplementarität der Expertise gesehen, indem ergänzend zu agrar-, ingenieur- und naturwissenschaftlichen Aspekten primär sozialwissenschaftli-



che, psychologische, ökonomische und juristische Fragestellungen bearbeitet werden. Als beteiligte Wissenschaftler für diese Bereiche sind Professor Lutz Kolbe (Wirtschaftsinformatik), Professor Kilian Bizer (Institutionenökonomik, Umwelt- und Regionalökonomik), Dr. Rüdiger Mautz (Sozialforschung, Industriosozilogie) sowie Professor Thomas Mann und Professor Peter-Tobias Stoll zu nennen, die das öffentliche Recht beziehungsweise Wirtschaftsrecht vertreten.

## Daten zum Forschungsknoten

**Sprecher/in:**  
Prof. Dr. Jutta Geldermann  
Prof. Dr. Lutz Kolbe

**Kontakt:**  
Abteilung Forschung,  
Georg-August-Universität Göttingen  
forschung@zvw.uni-goettingen.de



# Energieforschungsknoten der Leibniz Universität Hannover

## Organisation

26 Professoren als Mitglieder und damit mit mehr als 300 Doktoranden und Wissenschaftlern der Leibniz Universität Hannover (LUH) sind im interdisziplinären „Leibniz Forschungszentrum Energie 2050“ (LiFE 2050) zusammengeschlossen, wobei das Institut für Solarenergieforschung (ISFH) als An-Institut der LUH eingebunden ist. Ein sechsköpfiger Vorstand mit einem gewählten Sprecher koordiniert die Aufgaben. LiFE 2050 betreibt eine Geschäftsstelle, die die Prozesse zur Akquise von Verbundprojekten, zur interdisziplinären Vernetzung und zur Durchführung von Projekten durch Dienste und Werkzeuge unterstützt. Außerdem obliegt ihr die Außendarstellung des Forschungszentrums.

## Forschungsthemen

LiFE 2050 verfolgt das Ziel, Forschungsbeiträge für ein nachhaltiges, finanzierbares und zuverlässiges Energiesystem zu leisten. Dieses Energiesystem muss ferner umweltfreundlich sein und insbesondere die Emissionen von Treibhausgasen reduzieren. Dabei steht der Transformationsprozess von einem System mit großen konventionellen Energieerzeugungsanlagen hin zu einem System mit vielen kleinen dezentralen Erzeugungsanlagen auf Basis von erneuerbaren Energien im Fokus. Die Basis im LiFE 2050 bilden dazu leistungsfähige Forschungslinien im ingenieur- und naturwissenschaftlichen Bereich (siehe Abbildung 1). Sie werden ergänzt durch die Querschnittsthemen Wirtschaft, Recht und Umweltplanung.

Die Forschung in der Windenergie adressiert die gesamte Windenergieanlage und reicht von der Gründung, den Wellenlasten (Offshore), den Tragstrukturen und ihren Baustoffen über die Aeroelastik, Rotorblätter, Getriebe, Lager und Generatoren bis zur leistungselektronischen Energiewandlung und Netzeinbindung sowie deren Wirtschaftlichkeit und Finanzierung, wobei die Forschergruppe den Kreis von FORWIND Hannover enthält. Das Testzentrum für Tragstrukturen, das Generator-Umrichter-Labor, der Große Wellenkanal und andere Großgeräte stellen dafür eine herausragende Infrastruktur zur Verfügung. Schwerpunkte der Solarenergieforschung sind die kristalline Silizium-photovoltaik, Niedertemperatur-Solarthermie und die Entwicklung von dezentralen solaren Energieversorgungssystemen für Strom und Wärme. Dabei kommt der Wechselwirkungen von solaren mit nicht solaren Komponenten wie Speichern und Wärmepumpen besondere Bedeutung zu. Diese Themen werden vom ISFH gemeinsam mit Instituten der Elektrotechnik, des Maschinenbaus und der

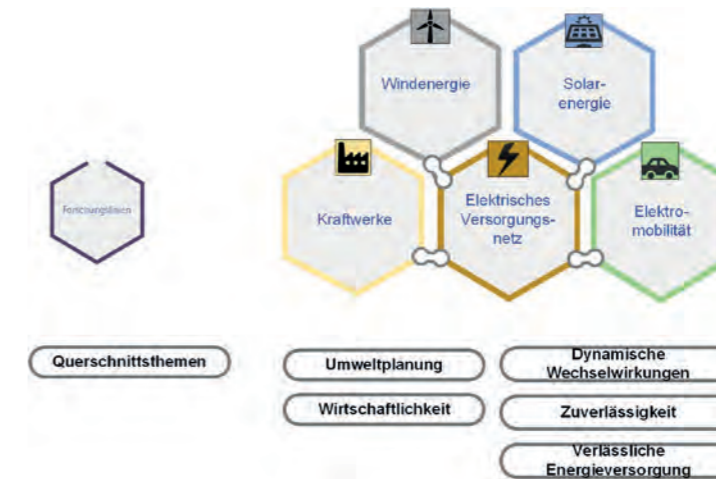


Abbildung 1: Forschungslinien und Querschnittsthemen des LiFE 2050

Physik erforscht. Die Experimentieranlagen des ISFH sowie des LNQE (Labor für Nano- und Quanten-Engineering) liefern für dieses Forschungsfeld umfangreiche experimentelle Möglichkeiten.

Forschung zu thermischen Kraftwerken mit den Hauptzielen der Flexibilisierung und Effizienzsteigerung wird gemeinsam von den Instituten für Thermodynamik, technische Verbrennung, Turbomaschinen, Kraftwerkssysteme, Werkstoffkunde, Dynamik und Schwingungen, elektrische Maschinen und Wirtschaftsinformatik durchgeführt. Ein neuer Forschungsbau „Dynamik der Energiewandlung“ und zugehörige Großgeräte konnten erfolgreich eingeworben werden und werden voraussichtlich 2019 in Betrieb gehen.

Das elektrische Versorgungsnetz wird von fünf Fachgebieten der elektrischen Energietechnik untersucht, ergänzt um Wirtschaftswissenschaften und Umweltplanung. Vorrangiges Forschungsziel ist es, die Stabilität des Stromnetzes auch bei stetig wachsendem Anteil von erneuerbaren Energien und Dezentralisierung zu beherrschen. Dazu tragen die Lehrstühle für elektrische Netze, Leistungselektronik, Elektrische Energiespeicher und so weiter bei.

In der Elektromobilität konzentrieren sich die Forschungsarbeiten vor allem auf den Antriebsstrang

(elektrisch und hybrid) inklusive Getriebe, auf die Netzeinbindung und auf Car-Sharing und urbane Logistik. Diese Forschungsaktivitäten sind zum großen Teil im NFF integriert.

Nahezu alle Mitglieder des LiFE 2050 arbeiten bereits in Verbundprojekten zu den genannten Themen zusammen. Darüber hinaus gibt es verschiedene Projekte mit Verbundpartnern des EFZN-Verbunds, beispielweise das von der LUH koordinierte NEDS-Projekt.

## Daten zum Forschungsknoten

**Bezeichnung:** Leibniz Forschungszentrum Energie 2050 (LiFE 2050)

**Sprecher:**  
Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens

**Ansprechpartner/Koordination:**  
Dr.-Ing. Volker Schöber,  
volker.schoeber@energie.uni-hannover.de



# Energieforschungsknoten der Universität Oldenburg

## Organisation

Die Oldenburger Energieforschung zählt nach über 30jähriger erfolgreicher Geschichte mittlerweile einen Kern von rund 30 Professorinnen und Professoren sowie insgesamt etwa 300 Forscherinnen und Forscher. Seit dem Jahr 2008 dient der Zusammenschluss „ENERiO“ (Energy Research in Oldenburg, [www.enerio.de](http://www.enerio.de)) als wesentliche Plattform interdisziplinärer Zusammenarbeit in der Oldenburger Energieforschung, die gleichzeitig die Organisationsform des EFZN-Knotens darstellt.

## Forschungsthemen

Die Oldenburger Energieforschung umfasst gleichermaßen universitäre wie außeruniversitäre (aus An-Instituten der Universität oder der FhG stammende) Akteure. Die inhaltliche Struktur sowie das Themenspektrum sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Alle neun genannten Felder in den drei Säulen „Materialien“, „Systeme“ und „Organisation“ zeichnen sich durch eine relevante Forschungs- und Personalstärke aus, so dass eine überregionale Kooperationsfähigkeit auch in entsprechenden EFZN-Verbundprojekten flächendeckend sichergestellt ist.



## Daten zum Forschungsknoten

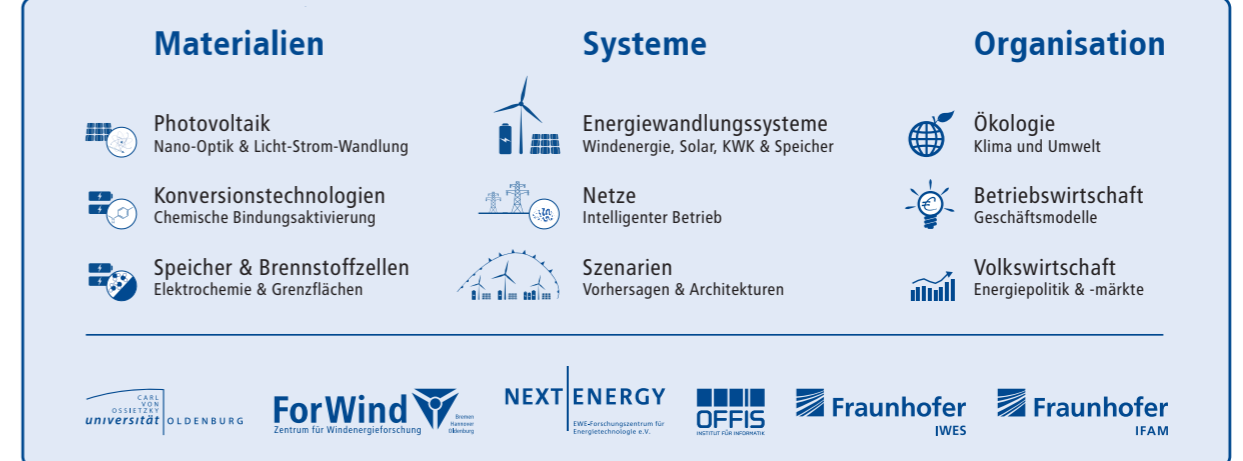
**Bezeichnung:**  
Energy Research in Oldenburg (ENERiO)

**Sprecher:**  
Prof. Dr. Carsten Agert  
Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff

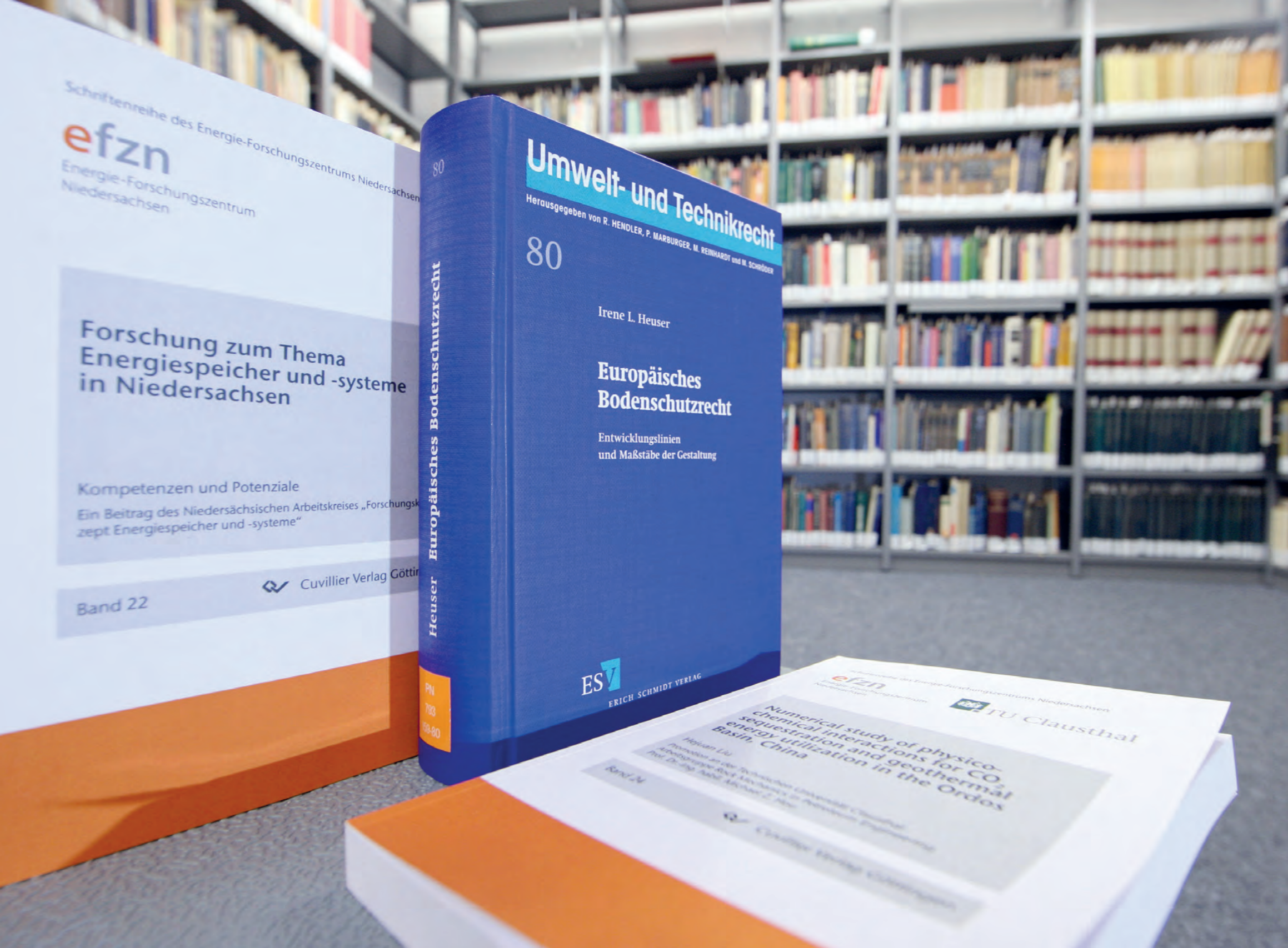
**Ansprechpartner/Koordination:**  
Dr. Wedigo von Wedel,  
[wedigo.von.wedel@next-energy.de](mailto:wedigo.von.wedel@next-energy.de)  
Dr. Jörg Bremer, [joerg.bremer@informatik.uni-oldenburg.de](mailto:joerg.bremer@informatik.uni-oldenburg.de)



## ENERGY RESEARCH IN OLDENBURG



Struktur der Oldenburger Energieforschung. Die Oldenburger Energieforschung besteht aus drei inhaltlichen Säulen, die von der Universität und den außeruniversitären An-Instituten bzw. FhG-Projektgruppen gemeinsam adressiert werden.



# Anhang

# 5

## Gremien des EFZN

### Vorstand 2014/2015

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath  
(*Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg*)  
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck  
(*Technische Universität Clausthal, Vorstandsvorsitzender*)  
Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat  
(*Technische Universität Braunschweig, stellvertretender Vorstandsvorsitzender*)  
Prof. Dr. Leonhard Ganzer  
(*Technische Universität Clausthal*)  
Prof. Dr. Jutta Geldermann  
(*Georg-August-Universität Göttingen*)  
Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens  
(*Leibniz Universität Hannover*)  
Prof. Dr. Wolfgang Schade  
(*Technische Universität Clausthal*)

### Kuratorium 2014/2015

Prof. Dr. Carsten Agert  
(*Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg, stellvertretender Vorsitzender*)  
Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann  
(*Technische Universität Dresden, stellvertretender Vorsitzender*)  
Dr. Werner Brinker  
(*EWE AG*)  
Norbert Conrad  
(*Nds. Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr*)  
Rüdiger Eichel  
(*Nds. Ministerium für Wirtschaft und Kultur*)  
Dr. Anke Grieße  
(*Nds. Ministerium für Umwelt und Klimaschutz*)  
Matthias Herzog  
(*E.ON Avacon AG, 2014*)  
Dr. Gerd Höher  
(*Nds. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung*)  
Prof. (em.) Dr.-Ing. Michael Jischa  
(*Technische Universität Clausthal, Beratendes Mitglied*)  
MR Michael Lindenthal  
(*Nds. Ministerium für Umwelt und Klimaschutz*)

Prof. Dr. Bernward Märländer  
(*Georg-August-Universität Göttingen*)  
Prof. Dr. habil. Dominik Möst  
(*Technische Universität Dresden*)  
Hubert Ovenhausen  
(*Siemens AG, Vorsitzender*)  
Prof. Dr. Andreas Rausch  
(*Technische Universität Clausthal*)  
Prof. Dr. Ulrich Reimers  
(*Technische Universität Braunschweig*)  
Ralph Schaper  
(*Salzgitter AG, seit 2013*)  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Seume  
(*Leibniz Universität Hannover*)  
Dr. Stephan Tenge  
(*Avacon AG, 2014*)  
Prof. Dr. Ugur Yaramanci  
(*Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik*)

### Mitglieder 2014/2015

Prof. Dr. Arnold Adam  
Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Jürgen Appelrath  
Prof. Dr.-Ing. Christos Argiris  
Prof. Dr. mult. Dr. h.c. Müfit Bahadır  
Prof. Dr. Gottfried Heinrich Bauer  
Prof. Dr. Hans-Peter Beck  
Prof. Dr. Dirk Bohne  
Prof. Dr. Carsten Brauckmann  
Prof. Dr. Michael H. Breitner  
Prof. Dr. Rolf Brendel  
Prof. Dr. Gunther Brenner  
Prof. Dr. Wolfgang Busch  
Prof. Dr. Wolf-Rüdiger Canders  
Prof. Dr. Jürgen Caro  
Prof. Dr. Michael Demuth  
Prof. Dr. Joachim Deubener  
Prof. Dr. Norbert Dichtl  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel  
Prof. Dr. Mathias Erlei  
Prof. Dr. Wolfgang Ertmer  
Prof. Dr. Gioia Falcone  
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich  
Prof. Dr. Jörg Müller  
Prof. Dr. Wolfgang Nebel  
Prof. Dr. Bernard Nacke  
Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer  
Prof. Dr. Heinz Palkowski

Prof. Dr. Jürgen Parisi  
Prof. Dr. Joachim Peinke  
Prof. Dr. Wolfgang Pfau  
Prof. Dr. Walter Pohl  
Prof. Dr. Gerhard Poll  
Prof. Dr. Bernd Ponick  
Prof. Dr. Karl-Heinz Pörtge  
Prof. Dr. Rolf Radespiel  
Prof. Dr. Kurt M. Reinicke  
Prof. Dr. Harald Richter  
Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig  
Prof. Dr. Ilona Rolles  
Prof. Dr. Karl-Heinz Rosenwinkel  
Prof. Dr. Joachim Rösler  
Prof. Dr. Hans Ruppert  
Prof. Dr. Peter Salje  
Prof. Dr. Martin Sauter  
Prof. Dr. Daniel M. Schaadt  
Prof. Dr. Wolfgang Schade  
Prof. Dr. Peter Schaumann  
Prof. Dr. Heike Y. Schenk-Mathes  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Gudrun Schmidt  
Prof. Dr. Peter Schmuck  
Prof. Dr. Hubert Schwarze  
Prof. Dr. Jörg Seume  
Prof. Dr. Michael Sonnenschein  
Prof. Dr. Thomas S. Spengler  
Prof. Dr. Joachim Stahlmann  
Prof. Dr. Peter-Tobias Stoll  
Prof. Dr. Ludwig Theuvsen  
Prof. Dr. Hossein Tudeshki  
Prof. Dr. Thomas Turek  
Prof. Dr. Cynthia A. Volkert  
Prof. Dr. Andreas Waag  
Prof. Dr. Roman Weber  
Prof. Dr. Heinz Wenzl  
Prof. Dr. Volker Wesling  
Prof. Dr. Hartmut Weyer  
Prof. Dr. Klaus-Peter Wiedmann  
Prof. Dr. Manfred Norbert Fisch  
Prof. Dr. Klaus Fricke  
Prof. Dr. Holger Fritze  
Prof. Dr. Leonhard Ganzer  
Prof. Dr. Jutta Geldermann  
Prof. Dr. Gerhard Gerold  
Prof. Dr. Daniel Goldmann  
Prof. Dr. Agust Gudmundsson  
Prof. Dr. Hans-Jürgen Gursky

Prof. Dr. Bent T. Hansen  
Prof. Dr. Lutz Hofmann  
Prof. Dr. Michael Z. Hou  
Prof. Dr. Diethelm Johannsmann  
Prof. Dr. Christian Jooss  
Prof. Dr. Martin Kappas  
Prof. Dr. Dieter Kaufmann  
Prof. Dr. Jürgen Köhler  
Prof. Dr. Lutz M. Kolbe  
Prof. Dr. Torsten Körber  
Prof. Dr. Günter Kosyna  
Prof. Dr. Wolfgang Kowalski  
Prof. Dr. Johann Kranz  
Prof. Dr. Per Krusche  
Prof. Dr. Gunther Kühne  
Prof. Dr. Werner F. Kuhs  
Prof. Dr. Hans-Joachim Kümpel  
Prof. Dr. Ulrich Kunz  
Prof. Dr. Michael Kurrat  
Prof. Dr. Arno Kwade  
Prof. Dr. Norbert Lamersdorf  
Prof. Dr. Oliver Langefeld  
Prof. Dr. Reinhard Leithner  
Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff  
Prof. Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Lux  
Prof. Dr. Thomas Mann  
Prof. Dr. Rainer Marggraf  
Prof. Dr. Jürgen Meins  
Prof. Dr. Kurt Mengel  
Prof. Dr. Roland Menges  
Prof. Dr. Axel Mertens  
Prof. Dr. Norbert Meyer  
Prof. Dr.-Ing. Dietmar P. F. Möller  
Prof. Dr. Uwe Morgner  
Prof. Dr. Jutta Winsemann  
Prof. Dr. Albrecht Wolter  
Prof. Dr. Gerhard Ziegmann  
Prof. Dr. Scient. Sonja Philipp  
Prof. Dr. Hans-Jörg von Mettenheim  
Dr. Rüdiger Mautz

### Mitarbeiter/Mitarbeiterinnen

### Verwaltung und Technik 2014/2015

Merle Behrens  
Andreas Bierwirth  
Dr. jur. Wolfgang Dietze



Andrea Freistein-Schade, M.A.  
Christoph Gröger  
Ralf Gustmann  
Dipl.-Päd. Anna Heinichen  
Pascal Heinichen  
Dipl.-EU-Sekretärin Jessica Heinicke  
Manuel Juhrs, B.A.  
Susanne Kaden  
Dipl.-Bibl. (FH) Nadine Kleinander  
Dirk Lichtenberg  
Dipl.-Ing. (FH) Silvia Löffelholz  
Dipl.-Ing. Frank Mattioli  
Karin Peya  
Lydia Rosandic  
Dr. Jens-Peter Springmann  
Fee Strahler  
Anja Stubbe  
Heike Stucki-Bammel  
Marco Tödteberg  
Jörg Zellmer

### Wissenschaft 2014/2015

Dipl.-Ing. Roger Aragall  
Dr.rer.nat. Elke Bozau  
Zhenhua Dai, M.Sc.  
Dipl.-Wirt.-Ing. Khatia Dzebisashvili  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Anne Friedrichs  
Birger Hagemann, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Friederike Kaiser  
Dr. Michael Koppe  
Zhen Liu, M.Eng.  
Dipl.-Wirt.-Ing. Angelique Mesch  
Carlos Andres Paz Carvajal, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Ralf Peix  
Nelson Perozo Baptista  
Dipl.-Ing. Sebastian Runge  
Dipl.-Ing. Matthias Thurmann  
Dr. Patrick Were  
Dipl.-Ing. Andreas Becker  
Dipl.-Ing. Holger Derlien  
Dipl.-Wirt.-Ing. Steven Hotopp  
Dipl.-Ing. Maik Becker  
Dipl.-Ing. Katrin Beyer  
Dipl.-Ing. Marina Bockelmann  
Dr. Andriy Borodin  
Dr. Antonio Rodolfo dos Santos  
Elbasiony Amr Mohamed W., M.Sc.

Dipl.-Ing. Jens Friedland  
Dipl.-Ing. Kathrin Harting  
Dr.-Ing. Raoul Heyne  
Sebastian Hofmann, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Andreas Köppen  
Chantal Kuhl, M.Sc.  
Dipl.-Chem. Rafael Kuwerts  
Dr. Abhishek Lahiri  
Dipl.-Phys. Marcel Marschewski  
Dipl.-Ing. Christine Minke  
Dipl.-Ing. Horst Mögelin  
Eva Prumbohm, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Laurens Reining  
Dipl.-Ing. Jens-Christian Riede  
Katharina Schafner, M.Sc.  
Maryam Shapouri Ghazvini, M.Eng.  
Dipl.-Ing. Lei Shi  
Dr.-Ing. Georgia Sourkouni-Argirusi  
Dipl.-Ing. Norman Spitzczok von Brisinski  
Dipl.-Ing. Sebastian Stenger  
Marina Unseld, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Sebastian Wagner  
Dipl.-Chem. Anne Willert  
Dipl.-Ing. Can Yilmaz  
Mingxing Bai, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Pablo Ballesteros Pazo  
Dr.-Ing. Ralf Bengler  
Dipl.-Ing. Abdelhamid Bentaleb  
Lennart Beushausen, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Yong Chen  
Yaroslava Dahle, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Architekt Philipp Eickmeyer  
Dipl.-Ing. Nikola Sophia Ell  
Dipl.-Ing. Maria Geng  
Andrè Finster, B.Eng  
Dipl.-Math. Wiebke Heins  
Dr. Knut Kappenberg  
Dipl.-Wirt.-Ing. Karolina Koring  
John Nicolas Meuthen, M.Sc.  
Dr.-Ing. Soroush Nakhaie  
Dipl.-Ing. Alexander Oberland  
Florian Pöschke, M.Eng.  
Dipl.-Kfm. David Sauss  
Nadine Scheffer, M.Eng.  
Desirée Schlesing M.Sc.  
Dipl.-Ing. Raimund Schnieder  
Dipl.-Ing. Gunnar Schulz  
Dipl.-Ing. Benjamin Schwake

Dipl.-Ing. Verena Spielmann  
Dr.-Ing. Andrej Stranz  
Dipl.-Ing. Eric Tchoupou Lando  
Marcel Thiele, M.Eng.  
Dipl.-Ing. Anja Ufkes  
Stefanie Walter, M.Eng.  
Qun Wang, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Benjamin Werther  
Wentao Feng, M.Sc.  
Dipl.-Ing. Qi Zhao  
Yang Gou, M.Sc.  
Dipl.-Geow. Tobias Kracke  
Mengting Li, M.Sc.  
Xuan Luo, M.Sc.  
Wei Xing, M.Sc.  
Lei Zhou, M.Sc.  
Dr. rer. nat. Martina Weichmann  
Dipl.-Inform. Serge Alexander Runge  
Jan Ahmels, M.A.  
Gregor Beyer, M.Sc.  
Dr. Lars-Peter Lauven  
Sebastian Mezger, M.Sc.  
Dr. Christoph Neumann  
Lucas Schubert, M.A.  
Dipl.-Wirt.-Ing. Sebastian van Cayzeele  
Ass. jur. Mandy Hrube  
Ass. jur. Franziska Lietz

Ass. jur. Diana Schneider  
Assessor Christoph Nadler  
Dipl.-Phys. Daniel Albrecht  
Dr. rer. nat. Timo Carstens  
Dipl.-Phys. Kay-Michael Günther  
Dipl.-Phys. Samir Hammadi  
Tobias Dörfler, M.Sc.  
Dr. Renè Feder  
Dr. Dongzhi Hu  
Dipl.-Phys. Peter Lützwow  
Dipl.-Phys. Christian Jürgen Mayer  
Dipl.-Ing. Jan Meyer  
Dipl.-Phys. Mario Mordmüller  
Dipl.-Ing. Antonio Nedjalkov  
Alexander Omelcenko, M.Sc.  
Dr. rer. nat. Rozalia Orghici  
Mag. rer. nat. Elke Pichler  
Dr. Gottfried Römer  
Dr. Wolfgang Schippers  
Eike Schnorbus  
Dr.-Ing. Michal Schulz  
Dr. Yuriy Suhak  
Dipl.-Phys. Anke Weidenfelder  
Dr. rer. nat. Ulrike Willer  
Dipl.-Phys. Yunhua Wu  
Dipl.-Phys. Hendrik Wulfmeier  
Jörg Zellmer

## Veröffentlichungen

### Monographien

#### 2015

Busch, Wolfgang; Kaiser, Friederike:  
*Pumpspeicher für die Energiewende – Spitzentechnologie auf Eis?: 3. Pumpspeichertagung des EFZN; Goslar, 26. und 27. November 2015*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN: 978-3-7369-9130-9  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.34)

Wenzl, Heinz; Kaiser, Friederike:  
*Erneuerbare erfolgreich integrieren durch Power to Heat : Dialogplattform des EFZN; Goslar, 5. und 6. Mai 2015*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-7369-9060-9  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.33)

Reinicke, Kurt M.:  
*Final Report of Geothermal Energy and High-Performance Drilling Collaborative Research Program (gebo): Niedersachsen; Goslar, Juli 2015*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-7369-9080-7  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.30,1-30,4)

Beck, Hans-Peter; Nakhaie, Soroush;  
Springmann, Jens-Peter:  
*Szenarienerstellung und -berechnung zur Analyse von Transportkapazitäten : Gutachten im Auftrag der Stadt Pegnitz; Goslar, 8. Juli 2015*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-7369-9078-4  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.29)

Aundrup, Thomas; Beck, Hans-Peter;  
Becker, Andreas:

*Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene: Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze; Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)*  
Frankfurt am Main: VDE, 2015  
(VDE-Studie)

Hou, Michael Z.; Zhou, Lei:  
*Numeric Investigations on Frac Propagation in Tight Gas Reservoirs with the FDM Program FLAC3D - Phase 3: Proppant Transport in Fluid and Closure Process*  
Hamburg: DGMK, 2015  
ISBN 978-3-941721-57-9

#### 2014

Busch, Wolfgang; Kaiser, Friederike:  
*Erneuerbare erfolgreich ins Netz integrieren durch Pumpspeicherung: 2. Pumpspeichertagung des EFZN für transdisziplinären Dialog; Goslar, 20. und 21. November 2014*  
Göttingen: Cuvillier, 2014  
ISBN 978-3-95404-825-0  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.23)

Beyer, Katrin; Ganzer, Leonhard;  
Mertens, Axel; Leithner, Reinhard:  
*Forschung zum Thema Energiespeicher und -systeme in Niedersachsen : Kompetenzen und Potenziale ; ein Beitrag des Niedersächsischen Arbeitskreises „Forschungskonzept Energiespeicher und -systeme“; Goslar, 16.10.2014*  
Göttingen: Cuvillier, 2014  
ISBN 978-3-95404-824-3  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.22)

Becker, Andreas; Lühn, Tobias; Mohrmann, Michael; Schlömer, Gerrit; Schmidtman, Geneveva; Schneider, Diana; Schnieder,

Raimund; Hofmann, Lutz; Beck, Hans-Peter;  
Geldermann, Jutta; Weyer, Hartmut:  
*Netzausbauvarianten in Niederspannungsverteilnetzen: regelbare Ortsnetztransformatoren in Konkurrenz zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen; eine technische und wirtschaftliche Betrachtung*  
Göttingen: Cuvillier, 2014  
ISBN 978-3-95404-757-4  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.20)

### Dissertationen

#### 2015

Heyne, Raoul:  
*Lebensdauerprognose von elektrochemischen Systemen unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellen*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-7369-9091-3  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.32)

Luo, Xuan:  
*Determination of a suitable mud window under HM and THM-coupled conditions in real-time*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-7369-9083-8  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.31)

Neumann, Christoph:  
*Allokation und Nutzung von erschöpfbaren Ressourcen : theoretische Grundlagen, experimentelle Evidenz und energiewirtschaftliche Auswirkungen*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-7369-9040-1  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.28)

Nakhaie, Soroush:  
*Reduzierung des Übertragungsnetzausbaus durch Minderung der Austauschleistungen zwischen den Übertragungs- und Verteilnetzen*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-95404-935-6

(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.27)

Rövekamp, Jessica:  
*Transportnetzberechnung zur Feststellung der Erdgasversorgungssicherheit in Deutschland unter regulatorischem Einfluss*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-95404-932-5  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.26)

Wundram, Lars:  
*Langzeit-Bohrungsverschluss: Konzeptentwicklung, numerische Modellierung und feldtechnische Erprobung*  
Göttingen: Cuvillier, 2015  
ISBN 978-3-95404-923-3  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.25)

#### 2014

Liu, Hejuan:  
*Numerical study of physico-chemical interactions for CO2 sequestration and geothermal energy utilization in the Ordos Basin, China*  
Göttingen: Cuvillier, 2014  
ISBN 978-3-95404-842-7  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.24)

Stenger, Sebastian:  
*Konstruktion und Simulation eines SOFC-Systems mit Anodenabgasrezirkulation*  
Göttingen: Cuvillier, 2014  
ISBN 978-3-95404-804-5  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.21)

Chen, Shaofei:  
*Simulation eines SOFC-Brennstoffzellensystems mit Anodenabgasrückführung*  
Göttingen: Cuvillier, 2014  
ISBN 978-3-95404-731-4  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.19)

Zhou, Lei:  
*New numerical approaches to model hydraulic fracturing in tight reservoirs with consideration of hydro-mechanical coupling effects*  
Göttingen: Cuvillier, 2014, ISBN 978-3-95404-656-0 (Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.18)

## Beiträge in wissenschaftlichen Fachzeitschriften

### 2015

Wulfmeier, Hendrik; Albrecht, Daniel; Fischer, Julian; Ivanov, Svetlozar; Bund, Andreas; Ulrich, Sven; Fritze, Holger:  
*Thin-film calorimetry : analytical tool for in-situ characterization of lithium ion batteries*  
Journal of the Electrochemical Society – Bd.162 (2015), H.4, S. A727-A736

Reitenbach, Viktor; Ganzer, Leonhard; Albrecht, Daniel; Hagemann, Birger:  
*Influence of added hydrogen on underground gas storage: a review of key issues*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6927-6937

Chromik, Andreas; dos Santos, Antonio R.; Turek, Thomas; Kunz, Ulrich; Häring, Thomas; Kerres, Jochen:  
*Stability of acid-excess acid-base blend membranes in all-vanadium redox-flow batteries*  
Journal of Membrane Science – Bd.476 (2015), S. 148-155

Yilmaz, Can; Güttel, Robert; Turek, Thomas:  
*Nullemissionen-Kraftwerk zur stofflichen Energiespeicherung sowie Strom- und Wärmeerzeugung*  
Chemie Ingenieur Technik – Bd.87 (2015), H.4, S. 419-425

Liu, Hejuan; Hou, Michael Z.; Li, Xiaochun; Wei, Ning; Tan, Xiao; Were, Patrick:  
*A preliminary site selection system for a CO<sub>2</sub>-AGES project and its application in China*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6855-6870

Gou, Yang; Zhou, Lei; Zhao, Xing; Hou, Michael Z.; Were, Patrick:  
*Numerical study on hydraulic fracturing in different types of georeservoirs with consideration of H<sup>2</sup>M-coupled leak-off effects*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.10, S. 6019-6034

Li, Mengting; Gou, Yang; Hou, Michael Z.; Were, Patrick:  
*Investigation of a new HDR system with horizontal wells and multiple fractures using the coupled well-bore-reservoir simulator TOUGH2MP-WELL/EOS3*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.10, S. 6047-6058

Zhou, Lei; Gou, Yang; Hou, Michael Z.; Were, Patrick:  
*Numerical modeling and investigation of fracture propagation with arbitrary orientation through fluid injection in tight gas reservoirs with combined XFEM an FVM*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.10, S. 5801-5813

Liu, Hejuan; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Sun, Xiaoling; Gou, Yang:  
*Numerical studies on CO<sub>2</sub> injection-brine extraction process in a low-medium temperature reservoir system*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6839-6854

Luo, Xuan; Were, Patrick; Liu, Hejuan; Hou, Michael Z.:  
*Estimation of Biot's effective stress coefficient from well logs*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 7019-7028

Lietz, Franziska:  
*Die Einspeisung von Wasserstoff und synthetischem Methan in das Erdgasnetz*  
ER: EnergieRecht – Bd.5 (2015), H.2, S. 61-67

Hou, Michael Z.; Xie, Heping; Zhou, Hongwei; Were, Patrick; Kolditz, Olaf:  
*Unconventional gas resources in China*

Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.10, S. 5785-5789

Feng, Wentao; Hou, Michael Z.; Zhou, Lei; Li, Mengting; Were, Patrick:  
*Semi-analytical and numerical investigation of hydraulic fracturing and geological barrier integrity based on a case study*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.10, S. 5825-5842

Kolditz, Olaf; Xie, Heping; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Zhou, Hongwei:  
*Subsurface energy systems in China: production, storage and conversion*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6727-6732

Xing, Wei; Zhao, Juan; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Li, Mengting; Wang, Guan:  
*Horizontal natural gas caverns in thin-bedded rock salt formations*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6973-6985

Lou, Xuan; Hou, Michael Z.; Kracke, Tobias; Gou, Yang; Were, Patrick:  
*Development of a semi-analytical method to calculate depth-dependent temperature and stress changes: investigation of micro-seismicity at Unterhaching Uha GT-2 geothermal well*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6769-6781

Zhang, Zhaopeng; Zhang, Ru; Xie, Heping; Liu, Jianfeng; Were, Patrick:  
*Differences in the acoustic emission characteristics of rock salt compared with granite and marble during the damage evolution process*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6987-6999

Wang, Guan; Xing, Wei; Liu, Jianfeng; Hou, Michael Z.; Were, Patrick:  
*Influence of water-insoluble content on the short-term strength of bedded rock salt from three locations in China*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6951-6963

Li, Mengting; Zhang, Haipeng; Xing, Wei; Hou, Michael Z.; Were, Patrick:  
*Study of the relationship between surface subsidence and internal pressure in salt caverns*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6899-6910

Hou, Michael Z.; Sen, Osman; Gou, Yang; Eker, Arif Mert; Li, Mengting; Yal, Gözde Pinar; Cambazoglu, Selim; Were, Patrick:  
*Preliminary geological, geochemical and numerical study on the first EGS project in Turkey*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6747-6767

Kolditz, Olaf; Xie, Heping; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Zhou, Hongwei (Guest editors):  
*Thematic Issue: Subsurface Energy Systems in China: production, storage and conversion*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11

Hou, Michael Z.; Xie, Heping; Zhou, Hongwei; Were, Patrick; Kolditz, Olaf (Guest editors):  
*Thematic Issue: Unconventional Gas Resources in China*  
Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.10

Stucchi, Marta; Bianchi, Claudia Letizia; Pirola, Carlo; Argiris, Christos; Sourkouni-Argirusi, Georgia; Sakkas, Petros; Kanellopoulou, D.; Cerrato, Giuseppina; Morandi, Sara; Capucci, Valentino:  
*Surface decoration of commercial micro-sized TiO<sub>2</sub> by means of high energy ultrasound: a way to enhance its photocatalytic activity under visible light*  
Applied Catalysis B: Environmental – Bd.178 (2015), S. 124-132

Sadykov, Vladislav A.; Sadovskaya, Ekaterina M.; Bobin, Aleksei S.; Kharlamova, Tamara S.; Uvarov, Nikolai Favstovich; Ulikhin, A. S.; Argiris, Christos; Sourkouni-Argirusi, Georgia; Stathopoulos, Vassilis N.:  
*Temperature-programmed C<sub>18</sub>O<sub>2</sub> SSITKA for powders of fast oxide-ion conductors: Estimation of oxygen self-diffusion coefficients*  
Solid State Ionics – Bd.271 (2015), S. 69-72

- Shapouri Ghazvini, Maryam; Pulletikurthi, Giridhar; Liu, Zhen; Prowald, Alexandra; Zein El Abedin, Sherif; Endres, Frank: *Electrodeposition and stripping behavior of a zinc/polystyrene composite electrode in an ionic liquid* Journal of Solid State Electrochemistry – Bd. 19 (2015), H.5, S. 1453-1461
- Pulletikurthi, Giridhar; Shapouri Ghazvini, Maryam; Prowald, Alexandra; Zein El Abedin, Sherif; Endres, Frank: *Template-free electrodeposition of zinc nanowires from an ionic liquid* ChemElectroChem – Bd.2 (2015), H.9, S. 1366-1371
- Minke, Christine; Turek, Thomas: *Economics of vanadium redox flow battery membranes* Journal of Power Sources – Bd.286 (2015), S. 247-257
- Hagemann, Birger; Rasoulzadeh, Mojdeh; Panfilov, Mikhail; Ganzer, Leonhard; Reitenbach, Viktor: *Mathematical modeling of unstable transport in underground hydrogen storage* Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6891-6898
- Hagemann, Birger; Rasoulzadeh, Mojdeh; Panfilov, Mikhail; Ganzer, Leonhard; Reitenbach, Viktor: *Hydrogenization of underground storage of natural gas : Impact of hydrogen on the hydrodynamic and bio-chemical behavior* Computational Geosciences – (Published Online 2015), S. 1-12
- Lindermeir, Andreas; Immisch, Christoph; Szepanski, Christian; Hamje, Jens; Bentaleb, Abdelhamid; Dörrer, Lars: *New SOFC-stack design with parallel-connected cells - Basic concept and joining aspects* Fuel Cells : From Fundamentals to Systems – Bd.15 (2015), H.5, S. 703-710
- Beck, Hans Peter; Wehrmann, Ernst-August; Bentaleb, Abdelhamid: *Untersuchungen zur Brennwertverfolgung in Gasverteilnetzen mit unvollständiger Messinfrastruktur* DVGW Energie-, Wasser-Praxis – (2015), H.4, S. 50-53
- Kühl, Lars; Ostermann, Morten; David, Ruth; Mahler, Boris: *Energieeffiziente Kältebereitstellung: Entwicklung eines Werkzeugs zur Bewertung von Kälteanlagen* KI Kälte Luft Klimatechnik: Die Brücke zwischen Wissenschaft und Praxis – Bd.51 (2015), H.8/9, S. 30-36
- Xie, Heping; Jiang, Wen; Xue, Ying; Hou, Michael Z.; Wang, Yufei; Wu, Dinglu; Liu, Tao; Wang, Jinlong; Tang, Liang: *Effect of water on carbonation of mineral aerosol surface models of kaolinite: a density functional theory study* Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 7053-7060
- Xie, Heping; Liu, Tao; Hou, Michael Z.; Wang, Yufei; Wang, Jinlong; Tang, Liang; Jiang, Wen; He, Yang: *Using electrochemical process to mineralize CO<sub>2</sub> and separate Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> ions from hard water to produce high value-added carbonates* Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2015), H.11, S. 6881-6890
- Xie, Heping; Hou, Michael Z.; Gao, Feng; Gao, Yanan: *A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: Principles, present situation and future* Journal of China Coal Society – Bd.40 (2015), H.5, S. 965-972
- Schulz, Michal; Mayer, Elena; Shrena, Ismail; Eisele, David; Schmitt, Martin; Reindl, Leonhard M.; Fritze, Holger: *Correlation of BAW and SAW properties of langasite at elevated temperatures* Journal of Sensors and Sensor Systems – Bd.4 (2015), H.2, S. 331-340
- Suhak, Yuriy; Schulz, Michal; Richter, Denny; Fritze, Holger: *High-Temperature Acoustical and Electrical Properties of LGS, LGT and CTGS resonators* Solid State Phenomena – Bd.230 (2015), S. 267-272
- 2014**
- Liu, Hejuan; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Gou, Yang; Sun, Xiaoling: *Simulation of CO<sub>2</sub> plume movement in multilayered saline formations through multilayer injection technology in the Ordos Basin, China* Environmental Earth Sciences – Bd.71 (2014), H.10, S. 4447-4462
- Hou, Michael Z.; Xie, Heping; Were, Patrick: *The special issue "Underground storage of CO<sub>2</sub> and energy" in the framework of the 3rd Sino-German conference in May 2013* Acta Geotechnica – Bd.9 (2014), H.1, S. 1-5
- Hou, Michael Z.; Xie, Heping; Were, Patrick (Guest editors): *The special issue Underground storage of CO<sub>2</sub> and energy* Acta Geotechnica – Bd.9 (2014), H.1
- Gou, Yang; Hou, Michael Z.; Liu, Hejuan; Zhou, Lei; Were, Patrick: *Numerical simulation of carbon dioxide injection for enhanced gas recovery (CO<sub>2</sub>-EGR) in Altmark natural gas field* Acta Geotechnica – Bd.9 (2014), H.1, S. 49-58
- Xing, Wei; Hou, Michael Z.; Zhao, Juan; Düsterloh, Uwe; Brückner, Dieter; Xie, Lingzhi; Liu, Jianfeng: *Experimental study of mechanical and hydraulic properties of bedded rock salt from the Jintan location* Acta Geotechnica – Bd.9 (2014), H.1, S. 145-151
- Lietz, Franziska: *Die Qualifikation von Stromspeicherbetreibern als Letztverbraucher – eine kritische Betrachtung* EWork – Zeitschrift des Instituts für Energie- und Wettbewerbsrecht in der Kommunalen Wirtschaft e.V. – Bd.14 (2014) H.2, S. 96-102
- Weyer, Hartmut; Lietz, Franziska: *Entflechtungsvorgaben für den Betrieb von Stromspeichern – Teil 1* ZNER - Zeitschrift für neues Energierecht – Bd.18 (2014), H.3, S. 241-245
- Weyer, Hartmut; Lietz, Franziska: *Entflechtungsvorgaben für den Betrieb von Stromspeichern – Teil 2* ZNER - Zeitschrift für neues Energierecht – Bd.18 (2014), H.4, S. 356-362
- Hou, Michael Z.; Liu, Hejuan; Were, Patrick; Gou, Yang; Xiong, Lun; Sun, Xiaoling: *Modelling CO<sub>2</sub>-brine-rock interactions in the Upper Paleozoic formations of Ordos Basin used for CO<sub>2</sub> sequestration* Environmental Earth Sciences – Bd.73 (2014), H.5, S. 2205-2222
- Wegewitz, Lienhard; Prowald, Alexandra; Meuthen, John; Dahle, Sebastian; Höfft, Oliver; Endres, Frank; Maus-Friedrichs, Wolfgang: *Plasma chemical and chemical functionalization of polystyrene colloidal crystals* PCCP: Physical chemistry, chemical physics – Bd.16 (2014), H.34, S. 18261-18267
- Xiao, Yanfen; Pichler, Elke; Hofmann, Meike; Bethmann, Konrad; Köhring, Michael; Willer, Ulrike; Zappe, Hans: *Towards integrated resonant and interferometric sensors in polymer films* Procedia Technology – Bd.15 (2014), S. 692-702
- Gimpel, Thomas; Kontermann, Stefan; Buck, Thomas; Baumann, Anna Lena; Günther, Kay-Michael; Wefringhaus, Eckard; Mihailetchi, Valentin; Lemp, Engelbert; Rudolph, Dominik; Theobald, Jens; Schade, Wolfgang: *Experimental implementation of a silicon wafer tandem solar cell* Energy Procedia – Bd.55 (2014), S. 186-189
- Atkin, Rob; Borisenko, Natalia; Drüschler, Marcel; Endres, Frank; Hayes, Robert; Huber, Benedikt; Roling, Bernhard: *Structure and dynamics of the interfacial layer*

between ionic liquids and electrode materials  
Journal of Molecular Liquids – Bd.192 (2014),  
S. 44-54

Sakkas, Petros M.; Schneider, Oliver; Sourkouni-Argirusi, Georgia; Argirusis, Christos:  
*Sonochemistry in the service of SOFC research*  
Ultrasonics Sonochemistry – Bd.21 (2014), H.6,  
S. 1939-1947

Zhou, Lei; Hou, Michael Z.; Gou, Yang;  
Li, Mengting:  
*Numerical investigation of a low-efficient  
hydraulic fracturing operation in a tight gas  
reservoir in the North German Basin*  
Journal of Petroleum Science and Engineering –  
Bd.120 (2014), S. 119-129

Argirusis, Christos; Antonaropoulos, Georgios;  
Sourkouni-Argirusi, Georgia; Jomard, Francois:  
*Oxygen tracer diffusion in single  
crystalline yttrium silicate*  
Solid State Ionics – Bd.262 (2014), S. 548-550

Argirusis, Christos; Jothinathan, Ezhil; Sourkouni,  
Georgia; Van der Biest, Omer; Jomard, Francois:  
*Oxygen self-diffusion and conductivity measure-  
ments in apatite type electrolyte materials for SOFCs*  
Solid State Ionics – Bd.257 (2014), S. 53-59

Dahle, Sebastian; Meuthen, John Nicolas;  
Schmidt, Andreas; Maus-Friedrichs, Wolfgang;  
Sourkouni-Argirusi, Georgia; Argirusis, Christos:  
*The influence of protecting polyelectrolyte layers  
on the temperature behavior of NaBD4*  
RSC Advances – Bd.4 (2014), S. 2628-2633

Sourkouni-Argirusi, Georgia; Voigts, Florian;  
Namyslo, Jan C.; Dahle, Sebastian;  
Maus-Friedrichs, Wolfgang; Argirusis, Christos:  
*Interaction mechanism of hydrogen storage  
materials with layer-by-layer applied protective  
polyelectrolyte coatings*  
International Journal of Hydrogen Energy –  
Bd.39 (2014), H.27, S. 14834-14842

Liu, Zhen; Borisenko, Natalia;  
Zein El Abedin, Sherif; Endres, Frank:

*In situ STM study of zinc electrodeposition on  
Au(111) from the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimi-  
dazolium trifluoromethylsulfonate*  
Journal of Solid State Electrochemistry –  
Bd.18 (2014), H.9, S. 2581-2587

Willert, Anne; Zein El Abedin, Sherif;  
Endres, Frank:  
*Synthesis of silicon and germanium nanowire  
assemblies by template-assisted electrodeposition  
from an ionic liquid*  
Australian Journal of Chemistry – Bd.67 (2014),  
H.6, S. 875-880

Xie, Heping; Xiong, Lun; Xie, Lingzhi;  
Hou, Michael Z.:  
*Preliminary study of CO<sub>2</sub> geological sequestration  
and enhancement of geothermal exploitation inte-  
gration in China*  
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineer-  
ing – Bd.33 (2014), Supp.1, S. 3077-3086

Liu, Jianfeng; Xie, Heping; Hou, Michael Z.; Yang,  
Chunhe; Chen, Liang:  
*Damage evolution of rock salt under cyclic loading  
in uniaxial tests*  
Acta Geotechnica – Bd.9 (2014), H.1, S. 153-160

Lühn, Tobias; Schlömer, Gerrit; Schmidtman,  
Genoveva; Lehde, Bianca; Schmiesing, Johannes;  
Hofmann, Lutz; Geldermann, Jutta:  
*Multi-criteria analysis of grid expansion concepts  
on the low voltage level*  
Zeitschrift für Energiewirtschaft – Bd.38 (2014),  
H.3, S. 183-200

### Zeitschriftenbeiträge

#### 2015

Kaiser, Friederike; Busch, Wolfgang:  
*Kolbenhub-Pumpspeicher - eine Alternative zu  
konventionellen Pumpspeichern?*  
WasserWirtschaft – Bd.105 (2015), H.6, S. 39-43

Ahmels, Jan:  
*Energiemärkte im Spannungsfeld zwischen  
Staat, Bürger und Wettbewerb*

Energiewirtschaftliche Tagesfragen –  
Bd.65 (2015), H.12, S. 93

Schlömer, Gerrit; Hofmann, Lutz:  
*Planungswerkzeug für den Einsatz regelbarer Orts-  
netztransformatoren aus Niederspannungssicht  
netzpraxis – Magazin für Energieversorgung –  
Bd.54 (2015), H.1-2, S. 63-65*

#### 2014

Kaiser, Friederike:  
*Pumpspeicherung – ein Beitrag zur Energiewende*  
InnoWATTion: das Magazin der Landesinitiative  
Energiespeicher und -systeme in Niedersachsen –  
(2014), H. 2, S. 16

Heyne, Raoul:  
*Batterie- und Sensoriktestzentrum  
am Energiecampus*  
InnoWATTion: das Magazin der Landesinitiative  
Energiespeicher und -systeme in Niedersachsen –  
(2014), H.2, S. 16

Peix, Ralf: *Wasserstoffspeicherung unter Tage*  
InnoWATTion: das Magazin der Landesinitiative  
Energiespeicher und -systeme in Niedersachsen –  
(2014), H.2, S. 17

Römer, Gottfried:  
*Vor Ort mit ganzer Energie*  
InnoWATTion: das Magazin der Landesinitiative  
Energiespeicher und -systeme in Niedersachsen –  
(2014), H.2, S. 17

Koring, Karolina; Maubach, Klaus-Dieter;  
Beck, Hans-Peter: *Funktionsorientierte  
Netzentgelte für die Energiewende*  
ew – Magazin für die Energiewirtschaft – (2014),  
H.8, S. 25-27

### Beiträge in Tagungsbänden

#### 2015

Wagner, Sebastian; Turek, Thomas:  
*Revision of the particle model for  
intercalation electrodes*

12th Symposium on fuel cell and battery mode-  
ling and experimental validation – ModVal 12,  
Freiburg, 26. – 27. März 2015 / Graduiertenkol-  
leg Energiespeicher und Elektromobilität  
Niedersachsen an der TU Braunschweig  
Braunschweig: GEENI an der TU Braunschweig,  
2015 – S. 132

Kaiser, Friederike:  
*Steady state analyse of existing compressed air  
energy storage plants: thermodynamic cycle  
modeled with engineering equation solver*  
Power and Energy Student Summit 2015,  
Dortmund, 13. – 14. Januar 2015 /  
Rehtanz, Christian; Kubis, Andreas  
Dortmund: Institut für Energiesysteme,  
Energieeffizienz und Energiewirtschaft, 2015 –  
S. S02.2 (S. 5)

Kippelt, Stefan; Gitis, Alexander; Echternacht,  
David; Kleimaier, Martin; Loges, Hauke; Becker,  
Andreas; Aundrup, Thomas; Berthold, Andreas;  
Pokojski, Martin; Leuthold, Matthias;  
Roterling, Niklas; Rehtanz, Christian;  
Sauer, Dirk-Uwe; Moser, Albert:  
*Dezentrale Energiespeicher: Studie zu Stromspei-  
chern in der Nieder- und Mittelspannungsebene*  
Von Smart Grids zu Smart Markets 2015: Beiträge  
der ETG-Fachtagung, Kassel, 25. – 26. März 2015  
/ Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG)  
Berlin: VDE-Verl., 2015  
ISBN 978-3-8007-3897-7 – S. 1-6

Spielmann, Verena; Bettinger, Carola; Skau,  
Katharina; Beck, Hans-Peter; Fuchs, Clemens:  
*Auswirkungen der Anreizsysteme für private PV-  
Anlagenbetreiber auf das lokale Verteilnetz*  
Nachhaltige Energieversorgung und Integration  
von Speichern : NEIS 2015, Hamburg,  
10. – 11. September 2015 / Schulz, Detlef  
Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015  
ISBN 978-3-658-10957-8 – S. 27-33

Schnieder, Raimund; Wehrmann, Ernst-August;  
Beck, Hans-Peter:  
*Einsatzmöglichkeiten regelbarer Ortsnetztransfor-  
matoren zur Spannungshaltung und Netzverlustre-  
duzierung in Niederspannungsverteilnetzen*

Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern : NEIS 2015, Hamburg, 10. – 11. September 2015 / Schulz, Detlef  
Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015  
ISBN 978-3-658-10957-8 – S. 64-69

Minke, Christine; Turek, Thomas:  
*Cost potentials for VRFB core components*  
The International Flow Battery Forum, Glasgow, United Kingdom, 16. – 17. Juni 2015  
Wiltshire: Swanbarton Ltd., 2015  
ISBN 978-0-9571055-5-3 – S. 42-43

Skau, Katharina; Fuchs, Clemens; Spielmann, Verena; Beck, Hans-Peter; Bettinger, Carola:  
*Renewable Energy – Opportunities for production and use of electrical power for farmers under conditions of the renewable energy act in Germany*  
Proceedings of the 20th International Farm Management Congress : Healthy Agriculture for a Healthy World, Quebec, Canada, 12. – 17. Juli 2015 / International Farm Management Association  
Cambridge: International Farm Management Association, 2015  
ISBN 978-2-7649-0495-4 – S. 429-435

Skau, Katharina; Bettinger, Carola; Spielmann, Verena; Fuchs, Clemens; Beck, Hans-Peter:  
*Betriebsstrategien für Biogasanlagen - Zielkonflikt zwischen netzdienlichem und wirtschaftlich orientiertem Betrieb*  
9. Rostocker Bioenergieforum, Rostock, 18. – 19. Juni 2015 / Nelles, Michael  
Rostock: Universität, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, 2015  
ISBN 978-3-86009-425-9 – S. 277-289

Schlömer, Gerrit; Hofmann, Lutz:  
*Niederspannungsnetzplanung mit rONT-Einsatz*  
16. Dresdener Kreis, Fachtagung der TU-Dresden, der Universität Hannover, der Universität Magdeburg und der Gesamthochschule Duisburg: Elektroenergieversorgung, Dresden, 25. – 26. März 2015

Hou, Michael Z.; Zhou, Lei; Weichmann, Martina; Li, Mengting; Feng, Wentao:

*A new numerical 3D-model for simulation of the whole hydraulic fracturing process in consideration of hydro-mechanical coupling effects*  
DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung des Fachbereiches Aufsuchung und Gewinnung, Celle, 22. – 23. April 2015 / DGMK, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung  
Hamburg: DGMK, 2015  
ISBN 978-3-941721-55-2 – CD-Rom

Hou, Michael Z.; Gou, Yang:  
*Hydrothermal coupled simulation of Unterhaching geothermal doublet system (A-281)*  
75. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Hannover, 23. – 26. März 2015  
Potsdam; Hannover: Deutsche Geophysikalische Gesellschaft; Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, 2015

#### 2014

Wagner, Sebastian; Turek, Thomas:  
*Simulation of porosity effects in lithium intercalation electrodes*  
Electrochemistry 2014 - Basic Science and Key Technology for Future Applications, Mainz, 22. – 24. September 2014 / Graduiertenkolleg Energiespeicher und Elektromobilität Niedersachsen an der TU Braunschweig  
Braunschweig: GEENI an der TU Braunschweig, 2014 – S. 251

Busch, Wolfgang; Kaiser, Friederike:  
*Nachnutzung von Altbergbau durch untertägige Pumpspeicher - Konzipierung, Status Quo und Aussicht*  
14. Altbergbau-Kolloquium, Gelsenkirchen, 06. – 08. November 2014 / Meier, Günter  
Nossen: Wagner, 2014  
ISBN 978-3-938390-14-6 – S. 118-131

Gitis, Alexander; Echternacht, David; Kleimaier, Martin; Becker, Andreas; Aundrup, Thomas; Berthold, Andreas; Pokojski, Martin; Leuthold, Matthias; Rotering, Niklas; Sauer, Dirk-Uwe;

Moser, Albert:  
*Dezentrale Energiespeicher: Einsatzmöglichkeiten, Bedarf und Wirtschaftlichkeit*  
VDE-Kongress 2014 Smart Cities: intelligente Lösungen für das Leben in der Zukunft, Frankfurt/Main, 20. – 21. Oktober 2014 / VDE  
Berlin: VDE, 2014  
ISBN 978-3-8007-3641-6 – S. 117-122

Heins, Wiebke; Ell, Nikola Sophia; Beck, Hans-Peter; Bohn, Christian:  
*State observation in medium-voltage grids with incomplete measurement infrastructure through online correction of power forecasts*  
2014 European Control Conference (ECC 2014), Strasbourg, France, 24. – 27. Juni 2014 / European Control Association  
Piscataway, NJ: IEEE, 2014  
ISBN 978-1-4799-4728-7 – S. 1306-1312

Schnieder, Raimund; Wehrmann, Ernst-August; Beck, Hans-Peter:  
*Spannungsregelung in Niederspannungsverteilnetzen durch regelbare Ortsnetztransformatoren im Mono- und Multisensorbetrieb*  
Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern : NEIS 2014 Konferenz, Hamburg, 18. – 19. September 2014 / Schulz, Detlef  
Hamburg: Helmut-Schmidt-Universität, 2014  
ISBN 978-3-86818-059-6 – S. 137-142

Minke, Christine; Turek, Thomas:  
*Technology cycle analysis for emerging technologies on the example of the vanadium redox flow battery*  
2014 World Automation Congress (WAC 2014), Waikoloa, Hawaii, USA, 3. – 7. August 2014 / Systems, Man and Cybernetics Society  
Piscataway, NJ: IEEE, 2014  
ISBN 978-1-4799-7255-5 – S. 382-387

Hagemann, Birger; Rasoulzadeh, Mojdeh; Panfilov, Mikhail; Ganzer, Leonhard; Reitenbach, Viktor:  
*Hydrogenization of underground storage of natural gas - Impact of hydrogen on bio-chemical transformations of stored gas*  
14th European Conference on the Mathematics

of Oil Recovery 2014 (ECMOR XIV), Catania, Italy, 8. – 11. September 2014 / European Association of Geoscientists and Engineers  
Red Hook, NY: Curran, 2014  
ISBN 978-1-63439-168-9 – S. 1641-1651

Bentaleb, Abdelhamid:  
*Untersuchung von Thermogeneratoren und DC/DC-Wandler für eine effiziente Abwärmeverstromung*  
Elektronik Power Management Congress, München, 02. Juli 2014  
Haar: Weka Fachmedien, 2014  
ISBN 978-3-645-50135-4

Schlömer, Gerrit; Hofmann, Lutz:  
*Methode zur automatisierten Bewertung des zukünftigen Ausbaubedarfs in der Niederspannungsebene unter Berücksichtigung verschiedener technischer Konzepte*  
13. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 12. – 14. Februar 2014  
Graz: Verl. der Techn. Univ., 2014  
ISBN 978-3-85125-310-8 – S. 253-255

Schlömer, Gerrit; Hofmann, Lutz:  
*Verwendung synthetischer Netzstrukturen zur Analyse des Netzausbaubedarfs in der Niederspannungsebene*  
15. Dresdener Kreis 2014, Fachtagung der TU-Dresden, der Universität Hannover, der Universität Magdeburg und der Gesamthochschule  
Duisburg: Elektroenergieversorgung, Leipzig, 19. – 20. März 2014

#### Beiträge in Sammelbänden

##### 2014

Beck, Hans-Peter; Becker, Andreas; Juhrs, Manuel; Nakhaie, Soroush:  
*Transdisziplinäre Energieforschung und Energiewende - der Beitrag des EFZN*  
Jahrbuch 2013 / Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft  
Braunschweig: Cramer, 2014  
ISBN 978-3-934656-33-8 – S. 33-60

## Studien- und Abschlussarbeiten

### 2015

Lamert, Andreas:

*Untersuchung der möglichen Wechselwirkungen dezentraler Erzeugungsanlagen mit  $\cos \varphi$  (P)-Kennlinie zur Spannungsstützung mit regelbaren Ortsnetztransformatoren*

Ehlers, Tiara:

*Technisch und wirtschaftlicher Vergleich konventioneller Netzausbaumaßnahmen (Leistungsausbau) mit dem Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren*

Strothe, Alexander:

*Analyse der Auswirkungen eines geänderten Leistungsfaktors von Windparks auf Blindleistungsbedarf, Spannungshaltung und Verluste eines Hochspannungsnetzes*

Krause, Björn Thorben:

*Innovativer Mobilitätsmarkt – Szenarioanalyse zur Entwicklung strategischer Handlungsoptionen der E-Carsharing Branche*

Aime, Tina Mani Simon:

*Comparison of various artificial lift technologies for depleting natural gas field*

Heinen, Andreas:

*Nutzung elektrischer Heizsysteme in privaten Haushalten in Verbindung mit Einspeisung aus PV-Anlagen*

Bohnenberger, Mario:

*Anforderungen an den Kraftwerkspark bei großer installierter EE-Leistung*

Stamr, Christian:

*Entwicklung und Erprobung eines verteilten MPPT-Regelverfahren für Thermogeneratoren in einem heterogenen Temperaturfeld über gesteuerte Ladungspumpen*

Zhou, Tiayni:

*Systemuntersuchungen zur Leistungsoptimierung eines SOFC-Stacks mit einem elektronischen Wandler*

### 2014

Janssen, Dirk:

*Untersuchung zur Auslegung eines Laststufenschalters für einen 50 kVA Transformator*

Kroos, Marie-Luise:

*Modellierung von Speichersystemen in Niederspannungsverteilnetzen*

Geßner, Ulf-Hendrik:

*Nutzereinstellungen zum E-Auto - Eine empirische Analyse*

Holtz, Thorben:

*Analyse der Attraktivität von Ländermärkten für Elektrofahrzeuge und für Hybridfahrzeuge als Brückentechnologie*

Güler, Sezen:

*Analyse der Attraktivität von Free-Flow Systemen in Deutschland*

Holze, Sarah:

*Identifikation der Marktattraktivität der Carsharing- und E-Carsharing-Branchen anhand des Porter Fives Forces Modell*

Pierre, Henri:

*Wellbore stability and improvement of operational drilling performance with water-based drilling fluids in shale rocks*

Kurth, Benedikt:

*Modellgestützte Analyse zukünftiger Energieversorgungsstrukturen in Stadtquartieren*

Stücher, Johannes:

*Einsatz von Spitzenlastkraftwerken zur Integration erneuerbarer Energien*

Fritz, Alexander:

*Nutzung von Gas- und Wärmenetzen zur Integration erneuerbarer Energiequellen*

Gebbe, Markus:

*Potentiale zur Nutzung überschüssiger elektrischer Energie zur Wärmebereitstellung*

Gräfenstein, Artjom:

*Netzausbau zur Integration erneuerbarer Energiequellen*

## Sonstige Publikationen

### 2015

Busch, Wolfgang; Kaiser, Friederike:

*Pressespiegel Pumpspeicher untertage & Energie-Forschungszentrum Niedersachsen: 2011 bis 2014 / Forschungsbereich Untertägige Pumpspeicher, 2015*

## Poster

### 2015

Spielmann, Verena; Bettinger, Carola;

Skau, Katharina; Beck, Hans-Peter;

Fuchs, Clemens:

*A highly transparent method of assessing the contribution of incentive systems applied in distributed energy systems to various technical objectives*

Poster präsentiert am 18.11.2015

anlässlich: International ETG Congress – Die Energiewende, 17. – 18. November 2015 in Bonn

Spielmann, Verena; Skau, Katharina;

Bettinger, Carola; Spielmann, Verena;

Fuchs, Clemens; Beck, Hans-Peter:

*Speicherung von PV-Energie und Nutzung in der Milchproduktion – Netzdienlichkeit und Wirtschaftlichkeit*

Poster präsentiert am 24.09.2015

anlässlich: 55. GeWiSoLa-Tagung, 23. – 25. September 2015 in Gießen

Bentaleb, Abdelhamid:

*Direkte Abwärmeverstromung in thermoelektrischen Energiesystemen*  
Poster präsentiert am 26.06.2015  
anlässlich: Technologietagung in TU Clausthal / IEE

dos Santos, Antonio Rodolfo; Hickmann, Thorsten; Turek, Thomas; Kunz, Ulrich:  
*Functionality integration in bipolar plates for vanadium redox-flow batteries*

Poster präsentiert am 16.06.2015

anlässlich: International Flow Battery Forum, 16. – 17. Juni 2015 in Glasgow

Yilmaz, Can; Güttel, Robert; Turek, Thomas:

*Zero-emissions power plant for chemical energy storage as well as power and heat generation*

Poster präsentiert am 21.03.2015

anlässlich: Energy, Science & Technology Kongress 2015, 20. – 22. März 2015 in Karlsruhe

### 2014

Riede, Jens-Christian; Turek, Thomas;

Kunz, Ulrich:

*The minimization of dendrites formation through pulse controlled electrodeposition of zinc for alkaline zinc-air batteries*

Poster präsentiert am 23.09.2014

anlässlich: Electrochemistry 2014, 22. – 24. September 2014 in Mainz

dos Santos, Antonio Rodolfo; Düerkop, Dennis; Widdecke, Hartmut; Kunz, Ulrich:

*Polyimide mixed matrix membrane for vanadium redox-flow batteries*

Poster präsentiert am 01.07.2014

anlässlich: International Flow Battery Forum, 01. – 02. Juli 2014 in Hamburg

Ghazvini Shapouri, Maryam; Prowald, Alexandra;

Löffelholz, Silvia; Zein El Abedin, Sherif;

Endres, Frank:

*Deposition/Stripping cycles of a zinc-polystyrene composite electrode in an ionic liquid*

Poster präsentiert am 30.04.2014

anlässlich: From the Witches Cauldrons in Materials Science : 6th Scientific Meeting“ aus den Hexenküchen der Materialwissenschaften“, 29. – 30. April 2014 in Goslar

## Vorträge

### 2015

Ahmels, Jan:

*Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050*

gehalten am 02.12.2015

anlässlich: Clausthaler Ökonomisches Oberseminar in der TU Clausthal

Ahmels, Jan; Ryspaeva, Isa:

*Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050*

gehalten am 11.11.2015

anlässlich: Workshop MOBILE4e (Teilprojekt von Schaufenster Elektromobilität Niedersachsen) in Goslar

Springmann, Jens-Peter:

*Herausforderungen der „Energiewende“ – Technische, ökonomische und gesellschaftliche Aspekte*

gehalten am 06.11.2015

anlässlich: Stadtgespräch Göttingen in Göttingen

Hou, Michael Z.:

*A new EGS concept to minimize microseismic activities and to maximize energy performance*

gehalten am 27.10.2015

anlässlich: Sino-German Conference on Sustainable Utilization of Geothermal Energy in China and Germany, 26. – 28. October 2015 in Beijing, China

Weyer, Hartmut:

*Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen für Batteriespeicher*

gehalten am 22.10.2015

anlässlich: VDE-Fachtagung „Batteriespeicher und Power-to-Heat - Konkurrenz oder Koexistenz?“ in Berlin

Richter, Harald:

*Non-Classical Computation of Apparent, Active and Reactive Powers and of the Active (Keynote Speech)*

gehalten am 15.09.2015

anlässlich: International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE 2015) in Singapur

Hou, Michael Z.; Luo, Xuan:

*Automated wellbore stability systems: determination of in-situ stresses using logging data*

gehalten am 15.09.2015

anlässlich: Celle Drilling 2015, 14. – 15. September 2015 in Celle

Ahmels, Jan:

*e-home Energieprojekt 2020*

gehalten am 13.07.2015

anlässlich: Smart Energy Workshop in Konstanz

Hou, Michael Z.:

*Underground storage of renewable energy*

gehalten am 08.06.2015

anlässlich: TUC Alumni Academy 2015 “Sino-German Forum on Sustainable Development and New Energy”, 06. – 11. Juni 2015 in Beijing, China

Hou, Michael Z.:

*A new numerical 3D-model for simulation of the whole hydraulic fracturing process*

gehalten am 02.06.2015

anlässlich: Sino-German Workshop “Unconventional Gas”, 02. Juni 2015 in Chengdu, China

Hou, Michael Z.:

*Concepts to simulate and minimize microseismic activities of geothermal systems*

gehalten am 30.05.2015

anlässlich: Presentation at the 4th Sino-German Energy Conference “Underground Clean Energy Systems and CCUS”, 30. – 31. Mai 2015 in Chengdu, China

Kaiser, Friederike:

*Unkonventionelle Pumpspeicher und Druckluftspeicherkraftwerke*

gehalten am 18.05.2015

anlässlich: Vortragsreihe „Aktuelle Herausforderungen der Elektrischen Energietechnik“ in Ilmenau

Riede, Jens-Christian; Turek, Thomas;

Kunz, Ulrich:

*Pulse-controlled electrodeposition of zinc - old technique for future applications*

gehalten am 14.04.2015

anlässlich: MaBIC15, 14. – 16. April 2015 in A Coruña, Spanien

Hagemann, Birger; Panfilov, Mikhail;

Ganzer, Leonhard; Reitenbach, Viktor:

*Numerical modeling of coupled hydrodynamic and bio-chemical processes in underground hydrogen storage*

gehalten am 02.02.2015

anlässlich: 6th International Conference on “Fundamentals & Development of Fuel Cells”, 3. – 5. Februar 2015 in Toulouse, Frankreich

### 2014

Ahmels, Jan: *Vorstellung des EFZN*

gehalten am 17.12.2014

anlässlich: Sustainability, Economics & Management, Praktikerforum in Oldenburg

Weyer, Hartmut:

*Netzausbau – „Bottle Neck“ der Energiewende?*

gehalten am 04.12.2014

anlässlich: Bundesfachplanung Übertragungsnetz in Essen

Hagemann, Birger; Panfilov, Mikhail:

*Modeling coupled hydrodynamic and bioreactive processes in UHS*

gehalten am 21.11.2014

anlässlich: Underground Sun Storage 2nd Stakeholder Workshop in Wien

Bentaleb, Abdelhamid:

*Weiterentwicklung und metrologische Validierung von Rekosystemen in der Gasversorgung – November 2014*

gehalten am 01.11.2014

anlässlich: Treffen des Forschungsgremiums Gasbeschaffenheit DVGW in Stuttgart

Ahmels, Jan:

*Simulation in der Energiewirtschaft – Beispiel EEG-Umlage*

gehalten am 30.10.2014

anlässlich: Studientag Energie – Schülerseminar in Goslar

Ganzer, Leonhard; Reitenbach, Viktor;

Albrecht, Daniel; Hagemann, Birger:

*Key issues related to underground storage of natural gas with added hydrogen*

gehalten am 28.10.2014

anlässlich: 24e Réunion des Sciences de la Terre, 27. – 31. Oktober 2014 in Pau, Frankreich

Hagemann, Birger; Rasoulzadeh, Mojdeh;

Panfilov, Mikhail; Ganzer, Leonhard;

Reitenbach, Viktor:

*Kinetic model with memory for biochemical reactions in underground hydrogen storage*

gehalten am 28.10.2014

anlässlich: 24e Réunion des Sciences de la Terre, 27. – 31. Oktober 2014 in Pau, Frankreich

Hou, Michael Z.; Luo, Xuan; Vogt, E.;

Wonik, Thomas; Zhou, Lei:

*Real-time calculation of suitable mud window using the logging data while drilling*

gehalten am 16.09.2014

anlässlich: Celle Drilling 2014 in Celle

Ahmels, Jan; Kruse, Ann; Hingst, Jens zum;

Bormann, Hinnerk; Faulstich, Martin:

*Keine Energie ohne Wasser – Nutzen und Kosten einer integrierten Strategie für die Energiewende*

gehalten am 10.09.2014

anlässlich: Energiewende – Gestaltungsanspruch und Betriebsalltag in Bremen

dos Santos, Antonio Rodolfo; Hickmann,

Thorsten; Turek, Thomas; Kunz, Ulrich:

*Development of improved bipolar plates for vanadium redox-flow batteries with functionality integration*

gehalten am 02.07.2014

anlässlich: International Flow Battery Forum, 01. – 02. Juli 2014 in Hamburg

Lietz, Franziska:

*Betrieb von Stromspeichern durch Netzbetreiber – Regulierungsrechtliche Rahmenbedingungen*

gehalten am 11.03.2014

anlässlich: Energy Storage Europe in Düsseldorf



Ahmels, Jan:  
*Solar Power Plant*  
gehalten am 10.01.2014  
anlässlich: Postgraduate Programme  
Renewable Energy (PPRE) in Oldenburg

### Besuche im EFZN 2014/2015 – Auszug

#### 2014

- Delegation polnischer Wirtschaftsförderer, Landkreis Trebnitz
- Landesbeauftragter für regionale Landesentwicklung Matthias Wunderling-Weilbier
- Deutsch-Chinesischer Ökopark Chingdao
- Fraktion Bündnis 90 Die Grünen
- University Nebraska-Lincoln
- Im Rahmen der Sommerreise: Niedersachsens Ministerpräsident Stephan Weil
- Bundeswirtschaftsminister Sigmar Gabriel
- Sitzung des Landeskabinetts Niedersachsen
- Deutsche Management-Akademie Niedersachsen
- Vorstand des Innovationsnetzwerks Niedersachsen
- Delegation AHK-USA Chicago

#### 2015

- Delegation aus Mexiko vom BMWi
- Abteilung Energie und Klimaschutz des Nds. Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz
- KEAN – Klimaschutz und Energieagentur Niedersachsen
- Delegation der Universidad La Serena/Chile
- Im Rahmen der Sommertour: Generalsekretär der CDU Niedersachsen Ulf Thiele MdL

- Dr. Stefan Birkner, Fraktion FDP Niedersachsen
- Delegation Sichuan University
- Delegation Studentinnen aus Abu Dhabi

### Veranstaltungen (Ausrichtung/Teilnahme) 2014/2015 – Auszug

#### 2014

- Niedersächsische Energiespeicher Winter School
- 7. Göttinger Energietagung
- Grundsteinlegung Batterie- und Sensoriktestzentrum
- Hannover Messe Industrie
- Studientag Energie
- ENSEA Midterm Conference
- 7. Niedersächsische Energietage
- ENSEA-Workshop mit EU-Kommission
- 2. Pumpspeicher-Tagung

#### 2015

- Einweihung des Batterie- und Sensoriktestzentrums
- Niedersächsische Energiespeicher Winter School
- Hannover Messe Industrie
- 8. Göttinger Energietagung
- Dialogplattform Power to Heat
- IdeenExpo
- Sino German Conference und ENSEA, Sichuan University
- ENSEA-Final Conference, Edinburgh
- 8. Niedersächsische Energietage
- 3. Pumpspeicher-Tagung

## Impressum

**Herausgeber:** Vorstand des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen  
Am Stollen 19 A  
38640 Goslar  
Telefon: (0 53 21) 38 16-80 00  
Telefax: (0 53 21) 38 16-80 09  
E-Mail: geschaeftsstelle@efzn.de  
Internet: www.efzn.de

**Bilder:** Christian Ernst: S. 22  
Hamburger Hafen und Logistik AG: S. 53, 54/55  
Anna Heinichen: S. 10, 14, 23, 24, 25, 27, 37 oben rechts  
Peter Heller: S. 146  
Manuel Juhrs: S. 29, 31  
Frank Stefan Kimmel: S. 149  
Dr. Michael Koppe: S. 16  
Christian Kreuzmann: S. 32/33, 36, 37 links, 39, 40, 41  
Franziska Lietz: S. 28  
Olaf Möldner: S. 37 unten rechts, 50/51, 140/141, 154/155  
Daniel Schmidt: S. 152  
EFZN: S. 15, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 30, 38, 46, 47, 48, 79, 103  
TU Braunschweig/Presse und Kommunikation: S. 144  
Leibniz Universität Hannover, Referat für Kommunikation  
und Marketing: S. 150  
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg: S. 153

Hier nicht erwähnte Fotos und Grafiken entstammen dem Privatarchiv der jeweils abgebildeten und neben dem Bild namentlich genannten Personen.

**Druck:** Quensen Druck + Verlag GmbH & CO. KG

April 2016

## Redaktionsteam



**Melanie Bruchmann**  
Mediengestalterin für  
Digital- und Printmedien



**Dr. Wolfgang Dietze**  
Leiter der Geschäftsstelle



**Anna Heinichen**  
Referentin für Presse- und  
Öffentlichkeitsarbeit