



## EST

Forschungszentrum  
Energiespeichertechnologien

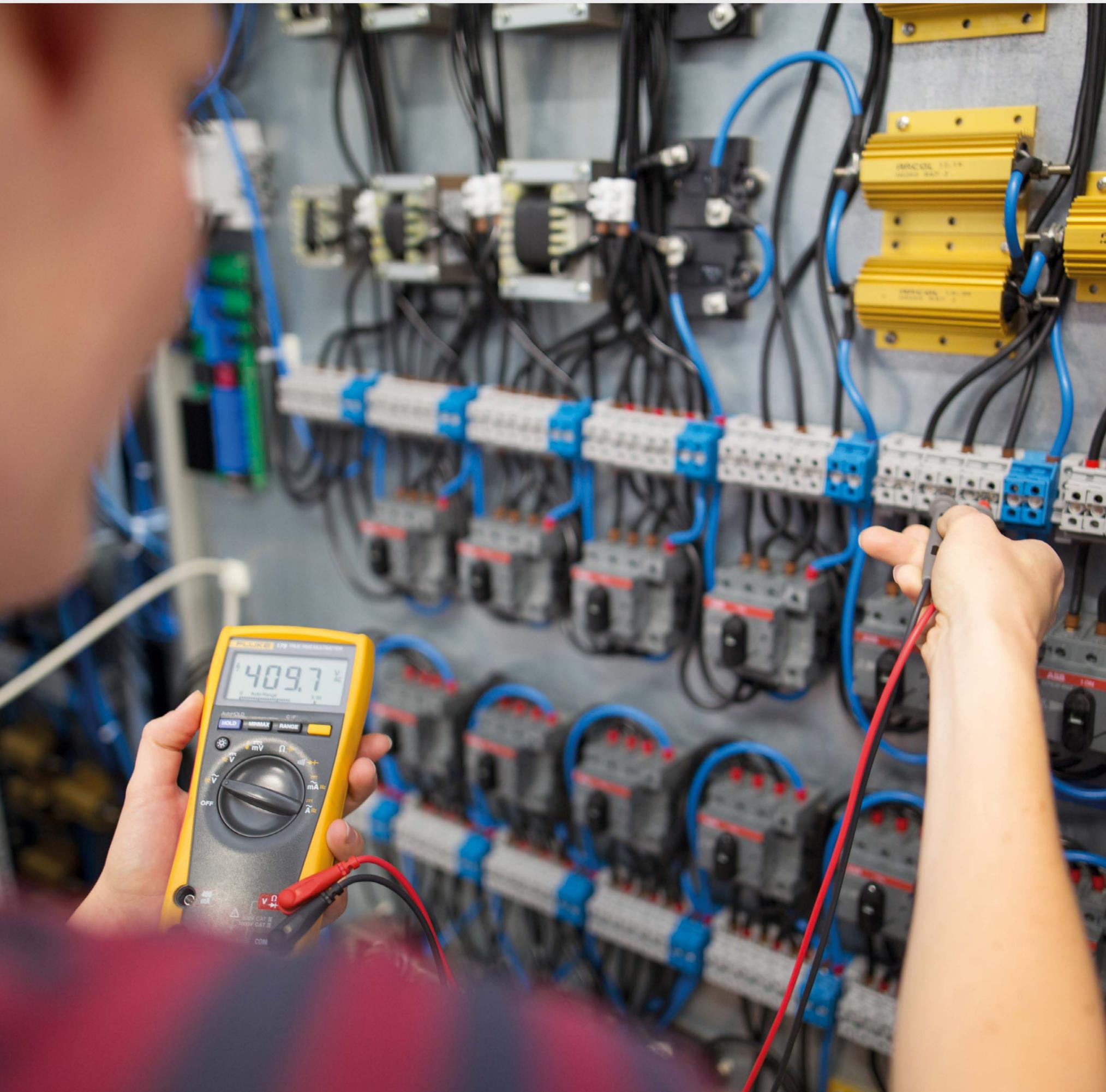
## Jahresbericht 2016/2017

des Forschungszentrums  
Energiespeichertechnologien (EST)



# Inhalt

<b>1. Strategische Weiterentwicklung der Energieforschung an der TU Clausthal</b> .....	<b>4</b>
Strukturelle Neuordnung der Energieforschung an der TU Clausthal .....	6
Evaluation und Integration CUTEC .....	7
Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST).....	8
<b>2. Geschäftsbericht und Infrastruktur</b> .....	<b>12</b>
Geschäftsbericht 2016/2017 .....	14
Drilling Simulator Celle .....	17
<b>3. Strategiebildende Forschungsprojekte in den Jahren 2016/2017</b> .....	<b>22</b>
Verbundprojekt H2STORE und seine Schwerpunkte .....	24
Verbundprojekt HyINTEGGER.....	30
Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch (OBS).....	36
Alkalische Wasserelektrolyse .....	39
Redox-Flow Batterien.....	42
MoBat: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik.....	47
ReserveBatt: Systemdienstleistungen für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems – Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien.....	51
Green Offshore – Nachnutzung der vorhandenen Öl- und Gas-Offshore-Infrastrukturen in der Nordsee .....	55
Huntorf2020 – Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff.....	57
AKZEPTANZ .....	60
Batteriespeicheranlagen im Multi-Purpose-Betrieb: Energiewirtschaftsrechtliche Rahmenbedingungen .....	63
SINTEG-Projekt enera: Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft .....	66
Epitaktische Abscheidung oxidischer piezoelektrischer Schichten.....	69
Konzentrationsabhängige Industrieofenregelung – Teilvorhaben: Sensorschicht- und Sensorentwicklung im Labormaßstab .....	72
Korrelation von Modell- und kommerziellen Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien mittels In-situ-Bestimmung thermodynamischer und kinetischer Daten.....	75
High-efficiency photovoltaic devices .....	83
PHOTOBIOSENSE: Dual getriebener photonischer Sensor zur Überwachung von Biogasanlagen .....	88
<b>4. Ausgewählte Beiträge zum Wissenstransfer</b> .....	<b>92</b>
Energieszenarien Niedersachsen 2050 – Runder Tisch Energiewende Niedersachsen.....	94
Batteriesicherheitscampus Deutschland nimmt Fahrt auf!.....	100
<b>5. Anhang</b> .....	<b>104</b>
Publikationen .....	106



STRATEGISCHE  
WEITERENTWICK-  
LUNG DER ENERGIE-  
FORSCHUNG AN  
DER TU CLAUSTHAL

1

## Strukturelle Neuordnung der Energieforschung an der TU Clausthal

Im Jahresbericht 2014/2015 des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) wurde es bereits angekündigt: Mit Beginn des Jahres 2016 wurde das EFZN – bis dato eine wissenschaftliche Einrichtung der TU Clausthal – in ein gemeinsames wissenschaftliches Zentrum der beteiligten fünf Mitgliedsuniversitäten in Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg weiterentwickelt. Das EFZN versteht sich gemäß dem zwischen den Präsidien geschlossenen Rahmenvertrag seither als Kooperationsplattform. Ihre Aufgaben sind es, gemeinsam vorrangig standortübergreifende Drittmittelprojekte zu initiieren und durchzuführen, sowie eine gemeinsame Energieforschungsstrategie im Land Niedersachsen strategisch abzustimmen. Ferner soll die niedersächsische Energieforschung national und auch international deutlicher ins Blickfeld gerückt werden – insbesondere durch vom EFZN organisierte gemeinsame Fachtagungen wie etwa den Niedersächsischen Energietagen.

Die disziplinübergreifende Clausthaler Energieforschung erfolgt seit Beginn des Jahres 2016 damit nun operativ im Energie-Forschungszentrum (EFZ) der TU Clausthal. Das EFZ wurde bereits im Jahr 2005 gegründet und stand als wissenschaftlicher Kern des früheren EFZN für mehr als 90 Prozent der dortigen Forschungsaktivitäten. Der Abschluss dieser Umstrukturi-

erung drückt sich seit Frühjahr 2018 auch in einem neuen Namen aus, dem „Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST)“. Das Clausthaler EST repräsentiert nunmehr einen der fünf gleichberechtigten sog. „Energieforschungsknoten“ der Mitglieduniversitäten. Seine disziplinübergreifende anwendungsorientierte Grundlagenforschung führt das Zentrum auch weiterhin an den Standorten Goslar, Celle und Clausthal-Zellerfeld durch, sowohl in strategiebildenden Verbundvorhaben mit den niedersächsischen Partnern aus dem EFZN-Netzwerk als auch darüber hinaus. Mit dem Ende des Kooperationsprojektes Niedersächsische Technische Hochschule (NTH) erstellte die bisher daran partizipierende TU Clausthal einen Masterplan, um sich mittel- bis langfristig strategisch neu auszurichten. Darin koordiniert das EST innerhalb der TU Clausthal den Forschungsschwerpunkt „Nachhaltige Energiesysteme“, einen der insgesamt vier Forschungsschwerpunkte, welchem jeweils ein federführendes Forschungszentrum zugeordnet ist. In diesem Zusammenhang kommt dem EST insbesondere auch bei der Förderung der Binnenvernetzung mit den energiebezogenen Fachabteilungen des neuen CUTEC-Forschungszentrums der TU Clausthal sowie dem Drilling Simulator Celle – Deutsches Zentrum für Hochleistungsbohrtechnik und Automatisierung eine wesentliche Rolle zu.



EnergieCampus

## Evaluation und Integration CUTEC

Das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) hat die Wissenschaftliche Kommission Niedersachsen (WKN) im Mai 2015 beauftragt, die Energieforschung in der Region Harz an der TU Clausthal, der landeseigenen Forschungseinrichtung Clausthaler Umwelttechnik Institut GmbH (CUTEC) und am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) zu evaluieren. Eine Kommission unter dem Vorsitz von Prof. Eberhard Umbach, dem ehemaligen Präsidenten des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), legte auf der Basis von umfangreichen Selbstberichten der beteiligten Einrichtungen sowie einer im April 2016 durchgeführten Begehung einen Bericht vor, der von der WKN unterstützt und schließlich im November 2016 verabschiedet und veröffentlicht wurde.

Für die bisherige Clausthaler Energieforschung im EFZN sahen die Gutachter die Konzentration großer Teile am Standort Goslar und den

Auf- und Ausbau der dortigen Forschungsinfrastruktur für die Forschung und die Region als gelungen und erfolgreich an. Insbesondere die Kooperation zwischen den Instituten und dem Zentrum wurde als gut funktionierend eingeschätzt, wenngleich auch nicht alle Energieforscherinnen und -forscher der TUC im EFZN organisiert waren. Positiv besonders hervorgehoben wurde auch die Bedeutung des Forschungszentrums für die interdisziplinäre und in Teilen auch interuniversitäre durchgeführte Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Bereich der Energieforschung. Die Kommission stellte allerdings auch fest, dass lediglich einzelne Institute bzw. Arbeitsgruppen nicht nur regional, sondern national wahrgenommen werden. Und daher die Energieforschung an der TU Clausthal insgesamt noch ausbaufähig sei.

Bezüglich der CUTEC GmbH empfahlen die Gutachter, zukünftig eine enge strukturelle und



personelle Verzahnung mit der TU Clausthal anzustreben, um das wissenschaftliche Profil zu schärfen, die Sichtbarkeit zu erhöhen und nicht zuletzt auch die finanzielle Situation deutlich zu verbessern. Das MWK richtete daraufhin einen Lenkungskreis ein, dem Vertreter des Ministeriums, des Präsidiums und der Professoren der TU Clausthal angehören. Dieser übernahm die Aufgabe, die wissenschaftliche Neuausrichtung der CUTEC GmbH und ihre strukturelle Integration in die TU Clausthal in Angriff zu nehmen.

Den Vorschlag für die inhaltliche Ausrichtung – und darauf aufbauend für die Abteilungsstruktur der wissenschaftlich arbeitenden Bereiche der CUTEC – entwickelten die Professoren Daniel Goldmann (Institut für Aufbereitung und Deponietechnik, IFAD), Hans-Peter Beck (Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme, IEE) und Thomas Turek (Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik, ICVT) in enger Abstimmung mit den Abteilungsleitern der CUTEC. Er sah vor, CUTEC als Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum in die TU Clausthal zu überführen, um Fähigkeiten und Kompetenzen von TU Clausthal und CUTEC zu bündeln. Dieser Vorschlag wurde vom MWK und den Gremien der TU Clausthal unterstützt, sodass

CUTEC schließlich am 1. August 2017 Teil der TU Clausthal wurde.

Das nunmehr vierte Forschungszentrum der TU Clausthal wird von einem Vorstand aus drei Professoren der TU Clausthal geleitet, dessen Vorsitz Prof. Daniel Goldmann übernahm. Das CUTEC-Forschungszentrum soll den Transformationsprozess Deutschlands hin zu einer nachhaltigen Industriegesellschaft aktiv unterstützen. Durch die Verknüpfung wissenschaftlicher Schwerpunktthemen aus den Forschungsschwerpunkten (FSP) der TU Clausthal „Rohstoffsicherung und Ressourceneffizienz“ und „Nachhaltige Energiesysteme“ bietet das CUTEC-Forschungszentrum eine einmalige interdisziplinäre Forschungsplattform.

Vorstand und Abteilungsleiter der CUTEC sind davon überzeugt, dass die Bearbeitung moderner Forschungsthemen aus den Bereichen der Kreislaufwirtschaft und der primären Rohstoffgewinnung sowie – in enger Zusammenarbeit mit dem Energieforschungszentrum der TU Clausthal – auf dem Feld der Sektorkopplung in der Energiewirtschaft das neue Forschungszentrum rasch wieder auf die Erfolgsspur bringen wird, wodurch sich zukünftig ein erheblicher Mehrwert für die TU Clausthal ergibt.

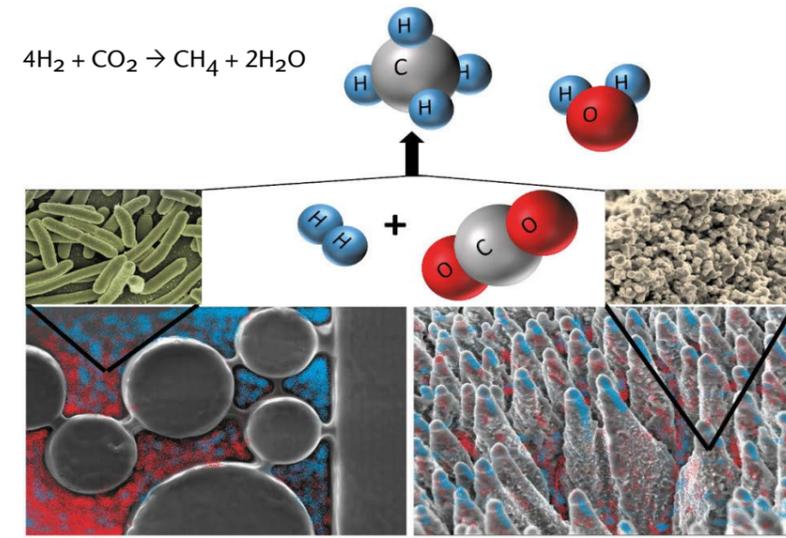


# Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST)

Die größte Herausforderung zukünftiger elektrischer Energiesysteme ist die fluktuierende Einspeisung regenerativer Energie aus den Ressourcen Sonne und Wind und damit verbunden die Gewährleistung kontinuierlicher Verfügbarkeiten und hinreichende Netzstabilität. Somit erlangen die Erforschung und Weiterentwicklung von Energiewandlungs- und Energiespeichertechnologien in den unterschiedlichsten Zeitskalen von Millisekunden bis hin zu Wochen, Monaten und Jahren eine große Bedeutung zum Erhalt der heutigen Versorgungssicherheit. Neben technologischen Weiterentwicklungen werden grundlegende Innovationen insbesondere durch die Erforschung neuer Materialien sowie maßgeschneiderter Materialfunktionalisierungen erwartet. Genau diese Kompetenz ist an der Technischen Universität Clausthal vorhanden und soll zukünftig mit den assoziierten Kerninstituten am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) in Goslar zur Bearbeitung wissenschaftli-

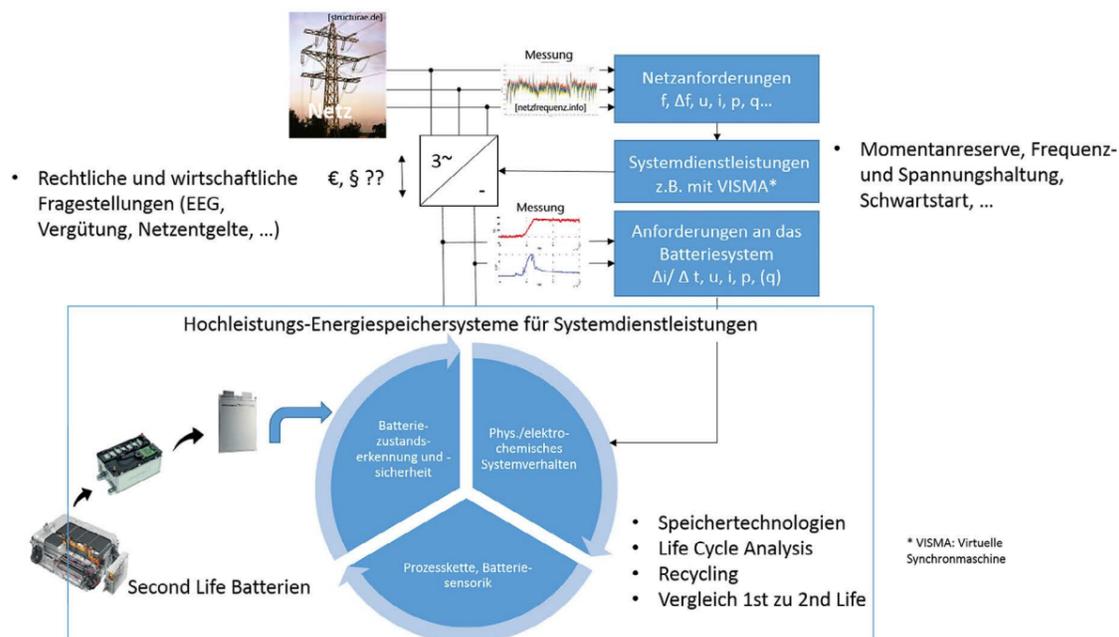
cher Fragestellungen in den drei neu aufgestellten *Forschungsclustern Energiewandlung und -speicherung, Materialfunktionalisierung und Systemintegration* fokussiert einfließen. Dieses erfolgt in einem ersten Schritt anhand zweier übergeordneter Leitthemen.

Das erste Leitthema beschäftigt sich mit der Untersuchung grundlegender Prozesse der Methanisierung, also der Wandlung von Wasserstoff mit Hilfe von CO<sub>2</sub> in Methan. Ein methodischer Ansatz ist die bakterielle Untertagemethanisierung in porösen Speichermedien, die hier mithilfe neuartiger Mikrofluidiksysteme nachgebildet und systematisch sowohl durch Modellierungen als auch experimentell untersucht werden sollen. Die katalytische Methanisierung in Rohrreaktoren ist der zweite methodische Ansatz. Hier sollen insbesondere neuartige Verfahren zur Herstellung maßgeschneiderter, reaktiver Oberflächen unter Verwendung von Ultrakurzpulslasern erstmals



eingesetzt und hinsichtlich möglicher Effizienzsteigerungen systematisch untersucht werden. In dem zweiten Leitthema werden Batteriespeicher und Systeme hinsichtlich ihrer system- und sicherheitstechnischen Anforderungen für die Kurzzeitstabilisierung zukünftiger Energienetze mit besonderem Hinblick auf den Einsatz von sogenannten „Second Life Batterien“ nach Erstinutzung in der Elektromobilität untersucht. Dabei stehen die Entwicklung geeigneter Testverfahren zur Vorhersage von Batteriealterung, Lebensdauerermittlung sowie mögliche Zertifizierungsprozeduren im Vordergrund der geplanten Forschungsarbeiten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten liefern die physikalisch-technischen Grundlagen für die Entwicklung einer Prozesskette zum Aufbau einer „Second Life Battery Lab Factory“ im Umfeld des Batterie- und Sensoriktestzentrums auf dem Energie-Campus der Technischen Universität in Goslar. Flankierend erfolgt darüber hinaus die Einbindung juristischer und wirtschaftlicher Fragestellungen.

lichten Mitgliederuniversitäten gewährleistet ist und so die nationale und internationale Sichtbarkeit der niedersächsischen Energieforschung weiter gestärkt und ausgebaut werden kann.



## Vorstand 2017 – 2020



**Prof. Leonhard Ganzer**  
Institut für Erdöl- und Erdgastechnik

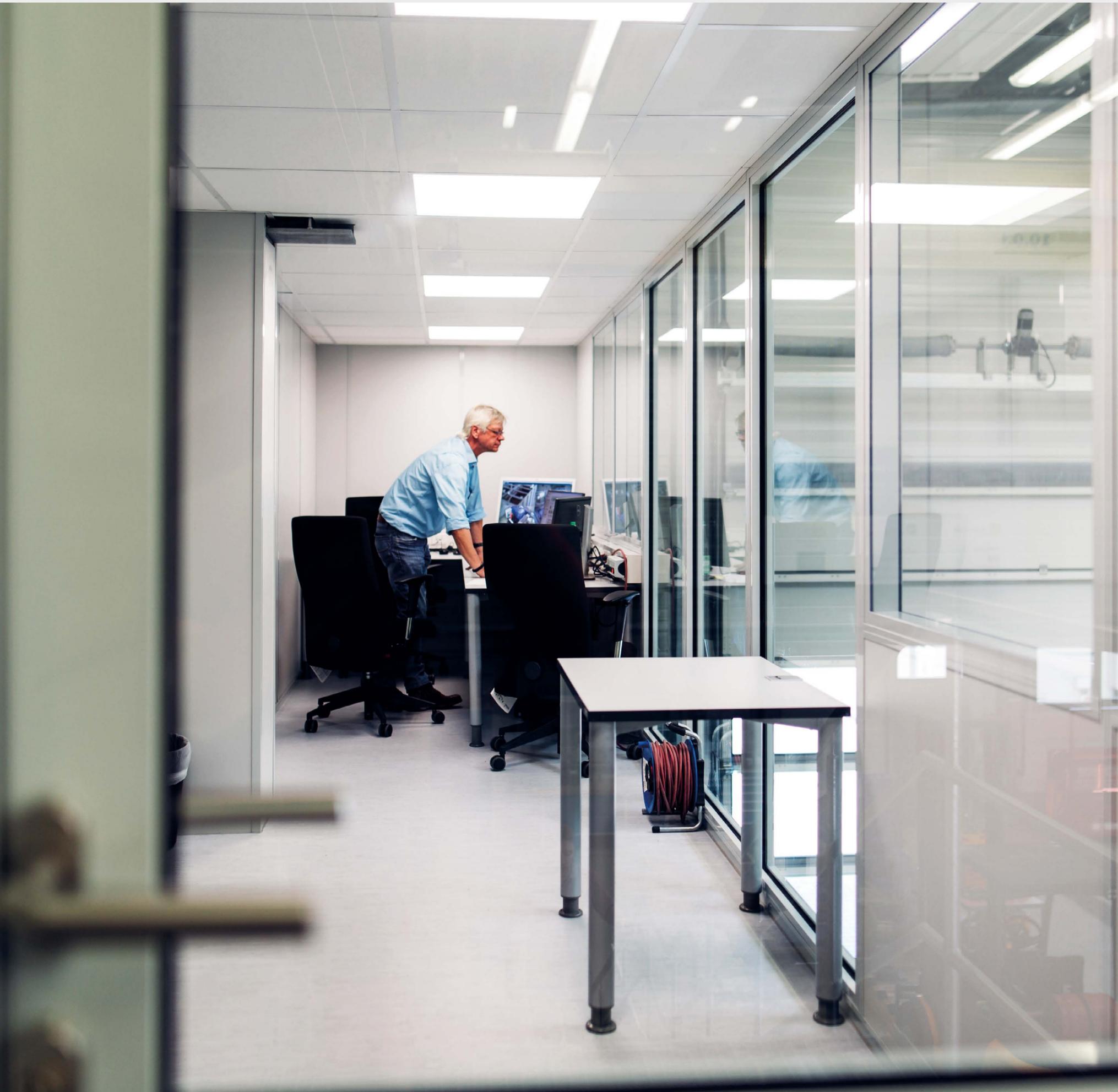


**Prof. Wolfgang Schade**  
(Vorsitzender)  
Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien



**Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek**  
Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik

Gemeinsam mit dem an der TU Clausthal assoziierten Fraunhofer HHI und den wissenschaftlichen Kompetenzen der beteiligten Kerninstitute wird durch die Fokussierung auf die beiden genannten Leitthemen ein sichtbares Alleinstellungsmerkmal sowohl in der Grundlagenforschung als auch im Transfer in die Wirtschaft erwartet. Darüber hinaus findet sich diese thematische Neuausrichtung des EST komplementär in den Forschungsschwerpunkten des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN) wieder, sodass zukünftig auch hier eine intensive Zusammenarbeit mit Forschern der betei-



## GESCHÄFTSBERICHT UND INFRASTRUKTUR

# 2.

## Geschäftsbericht 2016/2017

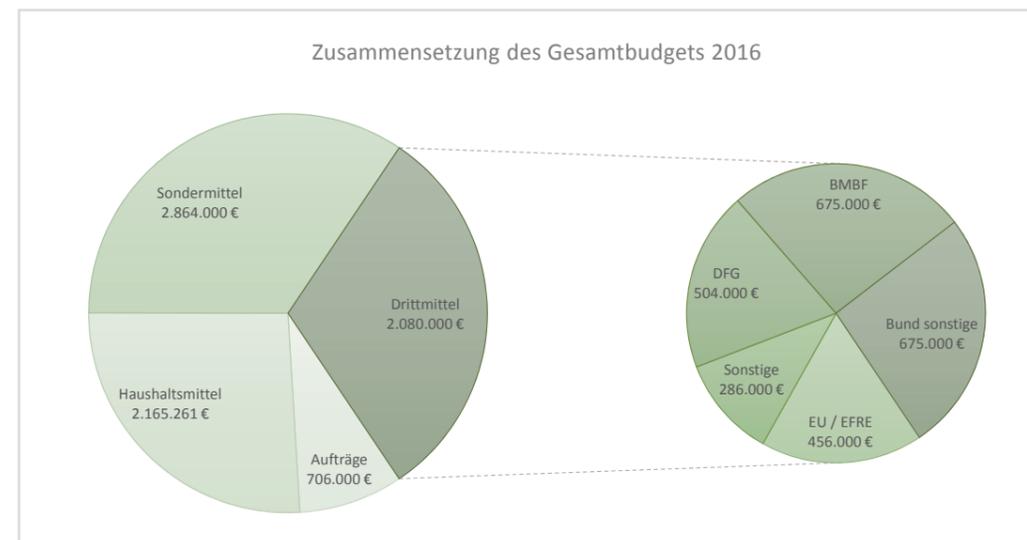
Die Jahre 2016 und 2017 standen auf der organisatorischen Seite im Zeichen der Neuorganisation des bisherigen Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), das bis dato als wissenschaftliche Einrichtung der TU Clausthal in Kooperation mit den Partneruniversitäten in Braunschweig, Göttingen, Hannover und Oldenburg organisiert war. Zu Beginn des Jahres 2016 stellte sich das EFZN als gemeinsames wissenschaftliches Zentrum der fünf beteiligten Mitgliedsuniversitäten auf. Zu dessen Aufgabengebieten zählen seitdem die Initiierung und Durchführung gemeinsamer, vorrangig standortübergreifender Drittmittelprojekte, die strategische Abstimmung einer gemeinsamen Energieforschungsstrategie in Niedersachsen sowie ein überregionales und internationales Marketing für die niedersächsische Energieforschung.

Die operativen Forschungsarbeiten auf dem EnergieCampus Goslar, am Drilling Simulator in Celle sowie z.T. auch am Standort Clausthal wurden seither unter dem Dach des „Energie-Forschungszentrums der TU Clausthal (EFZ)“ durchgeführt, welches als Vorgängerorganisation des EFZN bereits im Jahr 2005 gegründet wurde und mit diesem bislang weitestgehend deckungsgleich war. Unter Nutzung der in den Vorjahren an den Standorten Goslar und Celle aufgebauten Infrastruktur liefern die Clausthaler Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in diesem Zentrum seitdem ihre wissenschaftlichen Beiträge für das koordinierende gemein-

same EFZN-Netzwerk. Im Zuge der bereits an andere Stelle im vorliegenden Bericht ausgeführten strategischen Fokussierung im Clausthaler Forschungsschwerpunkt „Nachhaltige Energiesysteme“, tritt das Zentrum ab Frühjahr 2018 unter seinem neuen Namen „Forschungszentrum Energiespeichertechnologien – EST“ in Erscheinung.

Mit der organisatorischen Entflechtung beider Zentren, einem koordinierenden EFZN und einem forschenden EFZ der TU Clausthal, ist auch eine Umschichtung der jährlichen Grundfinanzierung aus Mitteln der TU Clausthal verbunden gewesen, welche jeweils anteilig beiden Einrichtungen zugute kommt. Als letzter Schritt der organisatorischen Neuaufstellung wurde zum 01.01.2017 die finanzielle Entflechtung vollzogen; seitdem bewirtschaften beide Einrichtungen getrennt zugewiesene jährliche Budgets.

Seit Beginn des Wirtschaftsjahres 2017 verfügt das Clausthaler Energieforschungszentrum über einen geplanten jährlichen Etat aus Haushaltsmitteln von rund 1,50 Millionen Euro für Personal- und Sachmittel, welche durch entsprechende budgetwirksame Drittmittelerträge eines Jahres erhöht werden. Aufgrund der durch den beschriebenen Organisationsprozess gegebenen Nichtvergleichbarkeit mit früheren Perioden wird an dieser Stelle lediglich auf die Budgetsituation im Berichtszeitraum eingegangen.



## Mitarbeiter der EFZ-Geschäftsstelle 2016/17:

### Leitung



Dr. Jens-Peter Springmann  
Administrativer Geschäftsführer

### Verwaltung



Fee Strahler



Heike Stucki-Bammel

### IT-Abteilung



Christoph Gröger  
(bis 06/2017)

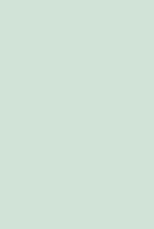


Anja Stubbe

### Bibliothek



Nadine Kleinander

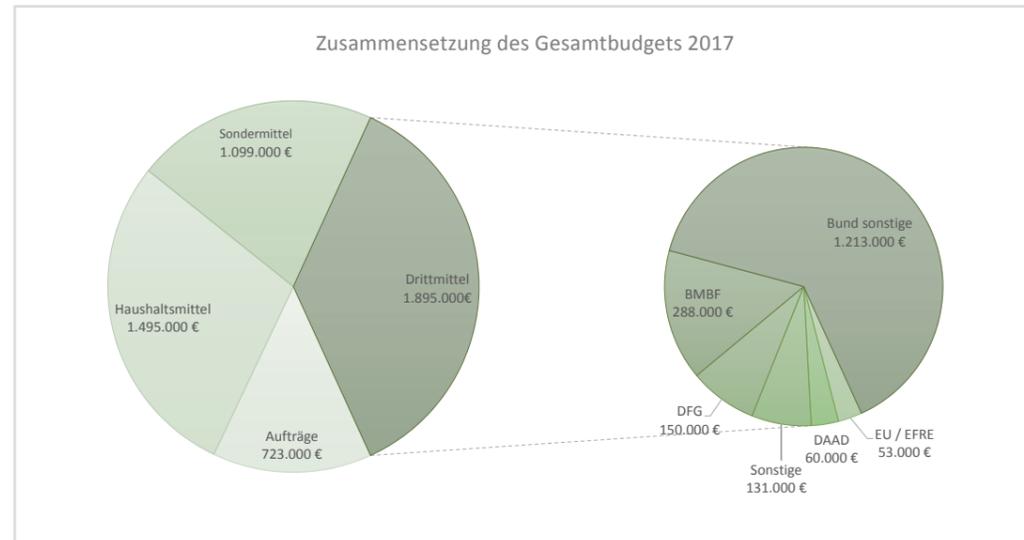


Anika Röhrig

### Haustechnik



Andreas Bierwirth



[Anmerk. 2017, vorläufig]

Die Abbildungen zeigen die Zusammensetzungen der Budgets in den Jahren 2016 und 2017. Der im Vergleich beider Jahre zu beobachtende Rückgang des Gesamtbudgets um rund ein Drittel auf den Wert von 5,21 Mio. € im Jahr 2017 ist dabei v.a. auf die Aufteilung des im Jahre 2016 noch gemeinsamen Budgets von EFZ und EFZN sowie dem Abschluss der Errichtungsphase des Drilling Simulators Celle und dem damit verbundenen Auslaufen entsprechender Fördermittel zurückzuführen. Betrachtet man für beide Jahre das jeweilige Verhältnis zwischen eingeworbenen Mitteln und planmäßigen Haushaltsmitteln, so lag dieser Wert im Jahr 2017 mit 2,49 leicht unter dem Vorjahreswert mit 2,85. Der Personalbestand blieb in

beiden Perioden dagegen nahezu unverändert. Im Bereich der wissenschaftlich-technischen Infrastruktur war der Berichtszeitraum insbesondere durch die Fertigstellung der apparativen Grundausstattung und Inbetriebnahme des Hardware-Simulators und des Software-Simulators am Drilling Simulator Celle sowie der Aufnahme des wissenschaftlichen Regelbetriebs im apparativ weiter ausgebauten Batterie- und Sensoriktestzentrum in Goslar gekennzeichnet. Im Labor für Aktive Verteilnetze lassen sich nach einer umfassenden im Berichtszeitraum erfolgten Umrüstung nunmehr auch verschiedenste Netztopologien flexibel aufbauen und das Verhalten netztechnischer Komponenten in dieser Versuchsumgebung experimentell untersuchen.

## Drilling Simulator Celle

### 1. Übersicht

Der Drilling Simulator Celle (DSC) stellt ein wesentliches Element zur Stabilisierung der Forschungsarbeiten des im Jahr 2014 erfolgreich abgeschlossenen niedersächsischen Forschungsverbundes „Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik – gebo“ dar. Diese Forschungseinrichtung der TU Clausthal stellt im Berichtszeitraum 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 gekoppelten wissenschaftlichen Großgeräten, dem sogenannten Software- und Hardware-Simulator, ist eine möglichst realitätsnahe Simulation des Tiefbohr-Prozesses – übrigens auch geplanter konkreter Bohrprojekte – möglich. Ziel der Simulation ist es, in der Praxis gefährliche und umweltschädigende Situationen zu vermeiden, kostenintensive Stillstandszeiten zu reduzieren, den ökologischen „foot-print“ (inklusive der CO<sub>2</sub>-Bilanz) zu verbessern, sowie langzeitstabile bauwerke im geologischen Untergrund 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 zur Jahresmitte 2015 mit dem zweiten Bauabschnitt abgeschlossen werden.

Seit März 2015 wird der DSC von Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt als Direktor geleitet. Im Zuge der Konkretisierung des wissenschaftlichen Konzepts hat das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur auf Antrag des DSC für die Ausstattung mit den beiden wissenschaftlichen Großgeräten ein Investitionsvolumen rund 2,7 Millionen Euro genehmigt. Darüber hinaus beteiligt sich das MWK für einen Zeitraum von fünf Jahren, bis 2020, an den laufenden Personal- und Sachkosten der

Einrichtung mit jeweils 300.000 Euro pro Jahr im Rahmen eines Projekts zur Förderung der Aufbauphase. Im Gegenzug hat sich der DSC per Antrag für die Finanzierung der Aufbauphase an das MWK verpflichtet, in demselben 5-Jahres-Zeitraum Drittmittel von insgesamt 5.000.000 Euro einzuwerben.

Ebenfalls bis Anfang 2020 unterstützt die Stadt Celle den DSC mit einem Personalkostenzuschuss in Höhe von jährlich circa 25.000 Euro. EFZN beziehungsweise TU Clausthal tragen darüber hinaus unbefristet einen weiteren Betrag von 150.000 Euro pro Jahr, wodurch die Personalkosten für den Teststandsleiter und einen Techniker abgedeckt werden.

### 2. Arbeits- und Zeitplan, Stand des Aufbaus

Der kurzfristige Arbeits- und Zeitplan des DSC orientiert sich zunächst an der fünfjährigen Aufbauphase, die am 01.06.2015 begann. Begonnen haben die Arbeiten mit drei Mitarbeitern im März 2015. Zum Berichtsdatum sind inzwischen am DSC im Rahmen der personellen Grundausstattung gemäß dem Aufbauprojekt sieben Personen beschäftigt. Es handelt sich dabei um zwei wissenschaftliche Mitarbeiter, einer davon als Post-Doc, den Teststandsleiter, ebenfalls promoviert, zwei Techniker, mit den Qualifikationen Bohrtechnik und Elektrotechnik, eine (1/2) administrative Kraft, und den Direktor, der gleichzeitig auch Inhaber (Verwalter) der Professur für Tiefbohrtechnik, Erdöl- und Erdgasgewinnung am Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) der TU Clausthal ist.

Die Bewilligung des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Geothermie-Förderung finanzierten Projekts „Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch“ (OBS), Förderzeitraum 01.08.2016 bis 31.01.2020, ermöglicht die Einstellung weiterer fünf Mitarbeiter. Davon wurden bisher drei wissenschaftliche Mitarbeiter mit dem Ziel der Promotion eingestellt. Wenn die beiden aktuell noch unbesetzten Stellen eines weiteren wissenschaftlichen Mitarbeiters und eines Technikers vergeben sind, wird am DSC eine Personalstärke von insgesamt 12 Personen erreicht sein.





Das erste der insgesamt zwei Großforschungsgeräte, der Software-Simulator, wurde im März 2016 geliefert und fertig installiert. Seither befassen sich zwei wissenschaftliche Mitarbeiter mit der Entwicklung der Software-Forschungsmodule. Dies erfolgt in engem Kontakt mit dem Hersteller Drilling Systems, der die benötigten Eingangs- und Ausgangsparameter auf entsprechende Anforderung freischaltet.

Der Aufbau des zweiten Großgeräts, des Hardware-Simulators, erfolgte aufgrund der Vielzahl der erforderlichen Einzelbestellungen in Abschnitten. Eine erste, relativ rudimentäre, Phase mit einigen Teilen der geplanten Ausrüstung konnte schon im September 2015 abgeschlossen werden, um entsprechende Kundenaufträge bearbeiten zu können. Im September 2016 war dann der Aufbau der Hardware im Wesentlichen abgeschlossen, sodass der Drilling Simulator Celle am 18. Oktober 2016 mit einer feierlichen Veranstaltung offiziell eröffnet werden konnte. Die zweite der beiden geplanten Spülpumpen konnte aufgrund von Liefer-schwierigkeiten des Herstellers erst in der ersten Jahreshälfte 2017 installiert werden. Die endgültige Inbetriebnahme des Hardware-Simulators erfolgte im September 2017, nachdem die außerordentlich komplexe speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und die aufwendige LabView-basierte Fernsteuerung fertig programmiert waren. Die komplette Bedienung des Hardware-Simulators erfolgt aus einer Leitstandskabine heraus, weil sich aus Sicherheitsgründen kein Mitarbeiter während des Betriebs in der Halle aufhalten kann. Eine zusätzliche technische Erweiterung des Hardware-Simulators erfolgt noch im Rahmen des OBS-Projekts.

### 3. Forschungsagenda und Drittmittelprojekte

Die bekannte Forschungsagenda des DSC wurde im Berichtszeitraum antragsgemäß weiterverfolgt. Insbesondere im Bereich des Software-Simulators wurde intensiv an der Entwicklung zusätzlicher untertägiger Software-Module mit dem Ziel einer realistischen Simulation des Bohrprozesses gearbeitet, wobei ein Schwerpunkt auf strömungstechnischen Fragestellungen lag.

Der Antrag zur Aufbauphase sieht vor, dass Fördermittel aus Forschungsprogrammen und Drittmittel von Firmenkunden in Höhe von insgesamt 5.000.000 Euro eingeworben werden. Bis zum Berichtsdatum wurden davon bereits circa 4.000.000 Euro eingeworben. Die Summe



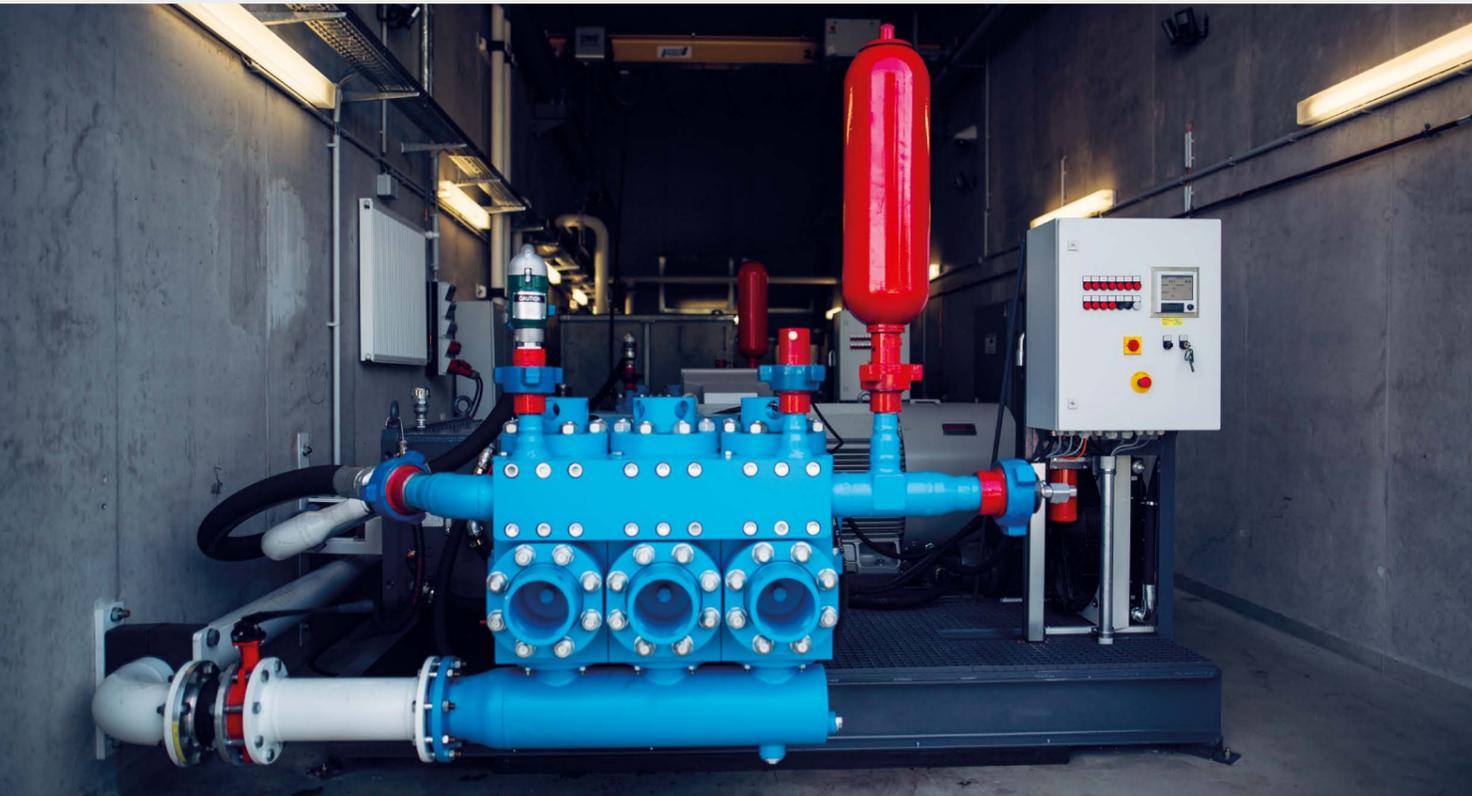
setzt sich zusammen aus 200.000 Euro für direkte Kundenprojekte, 3.000.000 Euro aus dem OBS-Projekt am DSC und 800.000 Euro aus dem OBS-Projektteil des Partners Institut für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig, die ebenfalls dem Drilling Simulator Celle zugerechnet werden.

Ein Förderantrag zur Modellierung und numerischen Simulation des Bohrkleintransports ist bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) eingereicht worden. Er wurde zwar zunächst abschlägig beschieden; die Argumente der Gutachter können jedoch relativ einfach entkräftet werden. In Vorbereitung befinden sich Anträge zur Dämpfung der Bohrstrangdynamik und zum Verschleißverhalten von Diamantbohrmeißeln, ebenfalls bei der DFG.

Nach der nunmehr erfolgten vollständigen Fertigstellung des Hardware-Simulators wird aktuell ein Schwerpunkt auf die Einwerbung von Drittmittel-Projekten für Industriekunden gelegt. Zwei Projekte mit internationalen Ölfeld-Servicefirmen befinden sich in Vorbereitung.

### 4. Verwendung der Fördermittel und Kostensituation

Die Mittel des MWK zur Förderung der Aufbauphase wurden im Berichtszeitraum bestimmungsgemäß verwendet. In der Finanzierungsplanung gemäß dem vom MWK bewilligten Antrag sind neben den Mitteln des MWK auch ein Anteil der Stadt Celle, ein Anteil aus Drittmitteln und ein Anteil des EFZN (aus dem jährlichen Zuschuss des MWK) vorgesehen. Letzterer wurde durch Beschluss des Vorstands als ein Festbetrag von jährlich 150.000 Euro als fester



Finanzierungsbaustein für den DSC festgelegt. Diese Finanzierung soll aus der bislang als „Ausfallbürgschaft DSC“ in Höhe von 300.000 Euro unpräzise geplanten Reserve des EFZN erfolgen.

### 5. Organisation und weitere Aktivitäten

In Übereinstimmung mit dem Antrag zur Förderung der Aufbauphase und dem im Juni 2015 im Präsidium verabschiedeten und dem MWK vorgelegten Papier zur Organisationsstruktur des DSC wurde am 06.06.2016 die konstituierende Sitzung des DSC Vorstands abgehalten, bestehend aus den Professoren Oppelt, Ostermeyer (berufen durch EFZN – TUBS) und Brenner (berufen durch SWZ – TUC). Eine eigene „Ordnung“ für den DSC wurde auf einer Vorstandssitzung am 14.11.2016 diskutiert, jedoch nicht verabschiedet. Inzwischen wurde durch Beschlüsse des Präsidiums der TU Clausthal und des Vorstands des EFZN mit Zustimmung des MWK entschieden, dass der DSC zukünftig, voraussichtlich ab 01.01.2018, direkt der TU Clausthal als Forschungszentrum zugeordnet wird. 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.

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.

Schließlich arbeitet der DSC aktiv daran, Teil eines Netzwerkes ähnlicher wissenschaftlicher Einrichtungen auf globaler Ebene zu werden, um den Stellenwert des Zentrums in Celle zu stärken. Hervorzuheben ist hier insbesondere das Institut IRIS (Norwegen), mit dem im Berichtszeitraum ein Vertrag zur Zusammenarbeit abgeschlossen wurde. In regelmäßigen Besprechungen erfolgt ein gegenseitiger Informationsaustausch und eine Kooperation bei der Beantragung gemeinsamer internationaler geförderter Forschungsprojekte sowie bei Fachveröffentlichungen und Software-Nutzung.

## Drilling Simulator Celle

### Leitung



Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt

### Sekretariat



Lydia Rosandic

### Teststandleitung



Dr.-Ing. Michael Koppe

### Postdoc Simulation



Dr.-Ing. Roger Aragall (bis 2017)

### Wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen



Dipl.-Ing. Lisette Hayn



Rodrigue Freifer, M.Sc.



Patrick Höhn, M.Sc.



Fabian Schmidt, B.Sc.

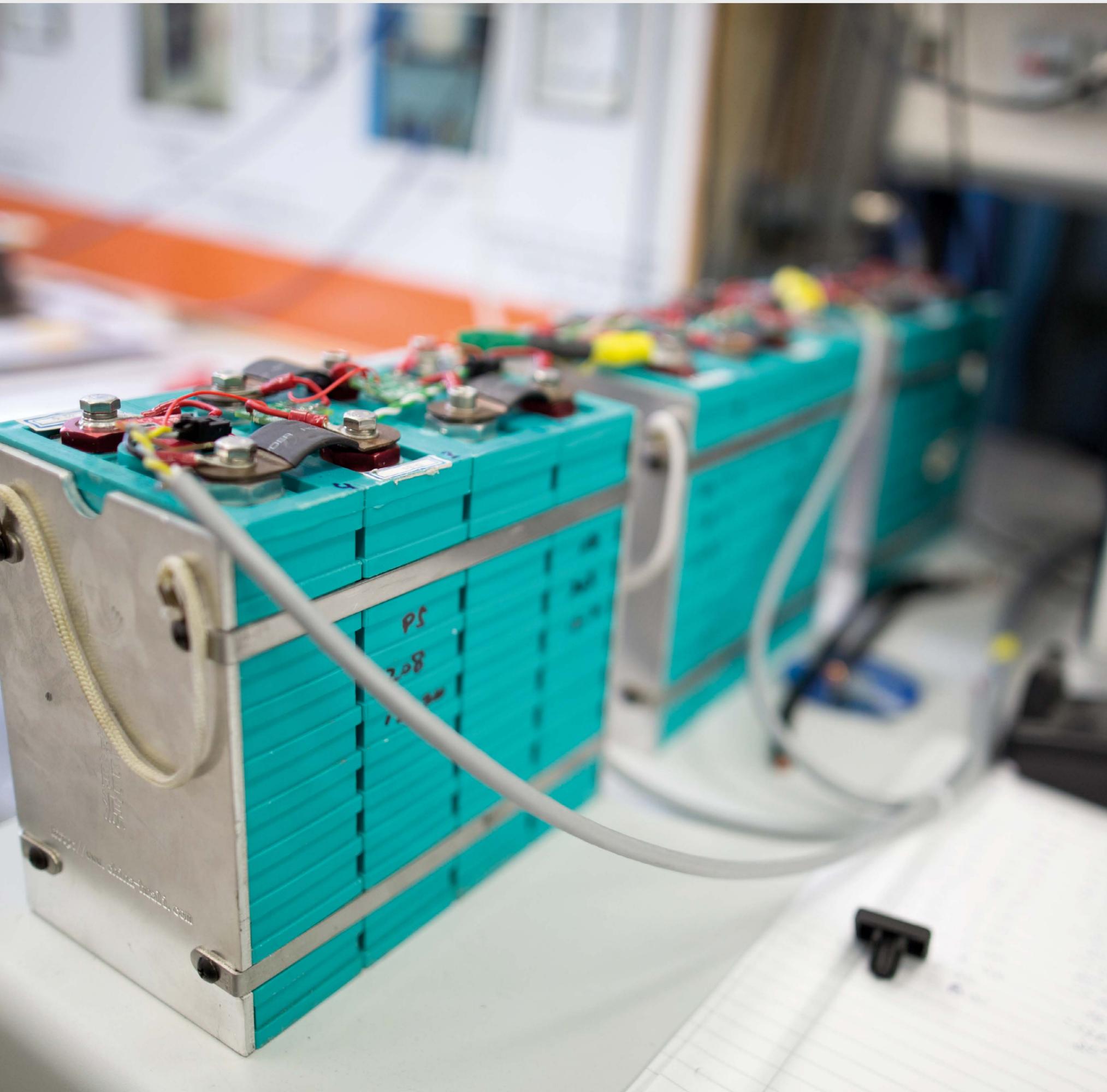
### Techniker



Ralf Gustmann



Gennadi Karlin



## STRATEGIEBILDENDE FORSCHUNGSPROJEKTE IN DEN JAHREN 2016/2017

# 3

## Verbundprojekt H2STORE und seine Schwerpunkte

### Kurzfassung

Lässt sich Strom unterirdisch langfristig in Form von Wasserstoff in Erdgaslagerstätten speichern? Dieser Frage gingen Wissenschaftler im Projekt H2STORE auf den Grund. Die Forscher untersuchen dabei geohydraulische, mineralogische, geochemische und biogene Wechselwirkungen bei der Wasserstoff-Speicherung unter Tage in ausgedienten Gaslagerstätten.

### Abstract

Could the hydrogen be stored in underground porous reservoirs in a long-term scale? Researchers in a joint research project H2STORE try to find out the feasibility of this technology. In this project they study the geo-hydraulic, mineralogical, geochemical and biogenic interactions, which could be induced by hydrogen in depleted natural gas fields converted to underground hydrogen storage.

### Projektforschungsstellen und Verbundpartner

- Friedrich Schiller Universität Jena (Prof. Dr. Gaupp)
- Technische Universität Clausthal/EFZN (Prof. Dr. Ganzer) und Université de Lorraine, Frankreich (Prof. Dr. Panfilov)
- Deutsches Geoforschungszentrum Potsdam (Prof. PD Dr. Michael Kühn, Prof. Dr. Hilke Würdemann, Dr. Axel Liebscher)

Verbundkoordination – Prof. Dr. Gaupp und Dr. Pudlo

### Industriepartner

- GDF SUEZ E&P DEUTSCHLAND GMBH
- E.ON Gas Storage GmbH
- Rohöl-Aufsuchungs Aktiengesellschaft (RAG), Österreich
- RWE Gasspeicher GmbH

### Verbundprojekt H2STORE und seine Schwerpunkte

Die Energiespeicherung in Form von Wasserstoff in unterirdischen Porenspeichern (zum Beispiel Sandsteinreservoirien von ausgeförderten Erdgaslagerstätten) ist bisher kaum beachtet worden. Sie stellt aber im Rahmen des geplanten Energiewechsels in Deutschland möglicherweise eine bedeutende Speicheroption dar. Für eine unterirdische Speicherung von Wasserstoff wurden bisher lediglich Salzkavernen in Betracht gezogen. Die Nachteile solcher Kavernen sind beispielsweise begrenzte Speicherkapazität für eher kurz- bis mittelfristige Zeiträume und das Fehlen ausreichend vieler geeigneter Salzvorkommen für den Kavernenbau). Das kann gegebenenfalls durch die Nutzung von Sandsteinreservoirien ausgeglichen werden, da diese potenziell ein vielfach höheres Speichervolumen über mehrere Monate hinweg besitzen und weltweit in ausreichender Menge auftreten. Jedoch waren mögliche Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff und solchen Sandstein-Reservoirien bislang nur ansatzweise untersucht worden. H2STORE untersucht daher detailliert solche möglichen Reaktionen mit besonderer Berücksichtigung der mineralogischen, chemischen, petrophysikalischen und mikrobiologischen Prozesse und deren Auswirkungen auf das Speichervermögen und die Dichtigkeit solcher Erdgaslagerstätten.

In H2STORE wurde weitestgehend Grundlagenforschung betrieben. Ziel war es, das Verhalten von Wasserstoff in natürlichen porösen Medien unter erhöhten Druck- und Temperaturbedingungen zu untersuchen. Eine direkte wirtschaftliche Nutzung im Rahmen dieses Projektes war nicht zu erwarten. Allerdings konnten aus den Untersuchungsergebnissen einige potenzielle Rahmenbedingungen für die geologische Wasserstoff-Porenspeicherung abgeleitet werden. Dadurch wurde ein wichtiger Beitrag für die Beurteilung der Eignung sowie zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit künftiger Wind-Wasserstoff-Porenspeicher geliefert. Zudem besitzen einige der Forschungsergebnisse auch eine Relevanz für andere Bereiche, vor allem der Energieversorgung, wie zum Beispiel auf die Speicherung und den Transport

von Wasserstoff in Erdgas-Pipelines, die Errichtung von Windparks, die Erweiterung der Herstellungsoptionen von „grünem“ Methan, etc.. Die Schwerpunkte und Arbeitsschritte der sechs beteiligten Teilprojekte unterteilen sich in folgende Hauptpunkte:

1. Bohrkern-Beprobung an verschiedenen Lokationen von konvertierten Gaslagerstätten und Erdgasspeichern;
2. Bestimmung der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der Gesteinsproben und deren petrophysikalischer Eigenschaften (zum Beispiel Porosität, Permeabilität), wobei Proben, die in den Laborexperimenten genutzt wurden (siehe Punkt 3) besonders detailliert untersucht werden;
3. Durchführung von Laborexperimenten unter Nutzung der gewonnenen Gesteinsproben bei Reservoir-Bedingungen (zum Beispiel Druck, Temperatur). Hierzu werden die Proben u. a. den standort-spezifischen Formationsfluiden, denen Wasserstoff zugesetzt wurde, ausgesetzt. Zur Klärung inwieweit es zu Reaktionen zwischen Wasserstoff und den Reservoir-Bestandteilen kam, wurden u. a. folgende Parameter bestimmt: Minerallösungen bzw. -fällungen, Veränderungen in den petrophysikalischen Eigenschaften und in den im Untergrund existierenden mikrobiellen Biozönosen hinsichtlich deren Zusammensetzung, der Abundanz von Bakterien und den katalytischen Stoffwechselprozessen;
4. Untersuchung der Gesteinsproben nach Beendigung der Experimente, hinsichtlich

der in Punkt 3 angeführten Parameter und Übergabe der in Punkt 2 und 4 erhobenen Datensätze an die Arbeitsgruppen, die damit numerische Simulationen durchführten (vergleiche Punkt 5);

5. Durchführung numerischer Simulationen (Modellierungen) hinsichtlich unter anderem der Ausbreitung von Wasserstoff im Untergrund, der Vermischung von Wasserstoff und den Formationsfluiden, der Alteration der Gesteine, der Interaktion zwischen Mikroorganismen und den wasserstoffführenden Wässern im Untergrund.

### Ergebnisse der Projektpartner

Im Teilprojekt TP1 der Technischen Universität (TU) Clausthal wurde experimentell untersucht, welche petrophysikalischen und geochemischen Veränderungen im Reservoir-Gestein und dem Deckgebirge durch die Einwirkung von Wasserstoff hervorgerufen werden und wie sie die Fluidtransporteigenschaften von Lagerstättengesteinen und die Barriere-Eigenschaften des Deckgebirges beeinflussen. Zu diesem Zwecke wurden Batch-Experimente mit Hochdruck-Hochtemperatur(HPHT)-Autoklaven im System Wasserstoff-Reservoir-/Deckgestein-Laugensystemen und Routine- sowie Special-Core-Analysis(SCAL)-Messreihen durchgeführt (Abbildung 1–3). Dabei zeigte sich, dass solche Modifikationen in den petrophysikalischen Eigenschaften standortspezifisch auftraten beziehungsweise auch fehlten.



Abbildung 1: Gesamtansicht der für die Versuche mit H<sub>2</sub> auf- bzw. umgebauten Anlagen mit dem Autoklav im linken Sicherheitsschrank, den Permeabilitätsmesszellen im rechten Sicherheitsschrank und dem dazwischen aufgestellten Flaschenschrank.



Abbildung 2: Autoklav für HPHT-Wasserstoffexperimente (links) und Permeabilitätsmesszellen für Versuche mit  $H_2$  (rechts) nach abgeschlossenem Auf- bzw. Umbau.

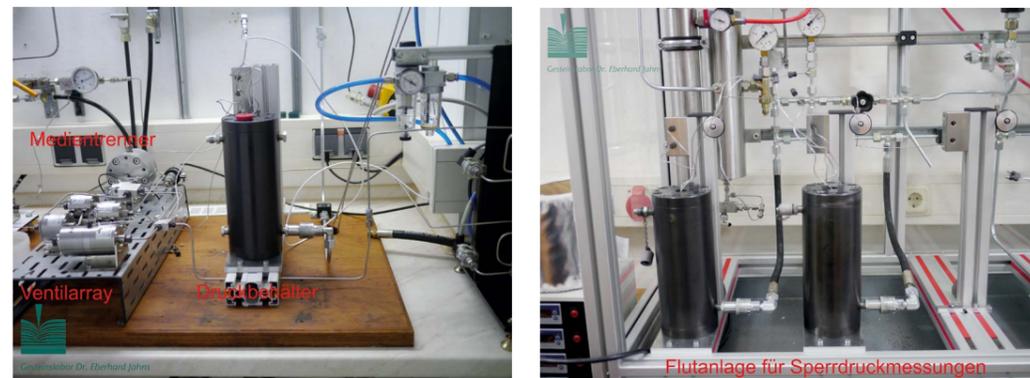


Abbildung 3: Die verwendeten Anlagen zur Sperrdruckmessung (linkes Bild) und Wasserstoffexposition (Fluten) (rechtes Bild) der Gesteinsproben.

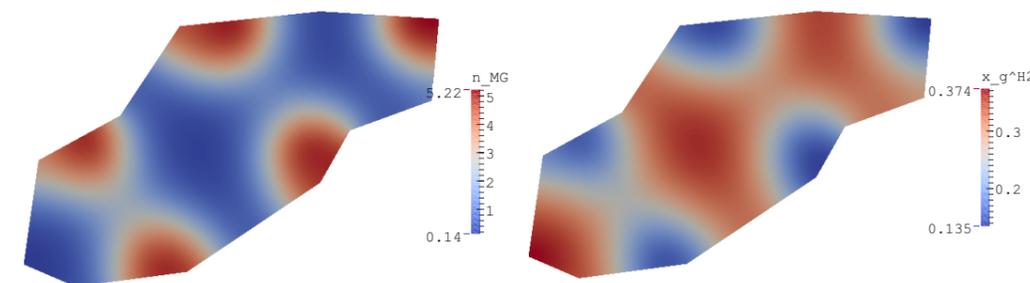


Abbildung 4: Anzahl der Mikroorganismen (links) und Wasserstoffkonzentration (rechts) in einem zweidimensionalen Speichermodell (Draufsicht)

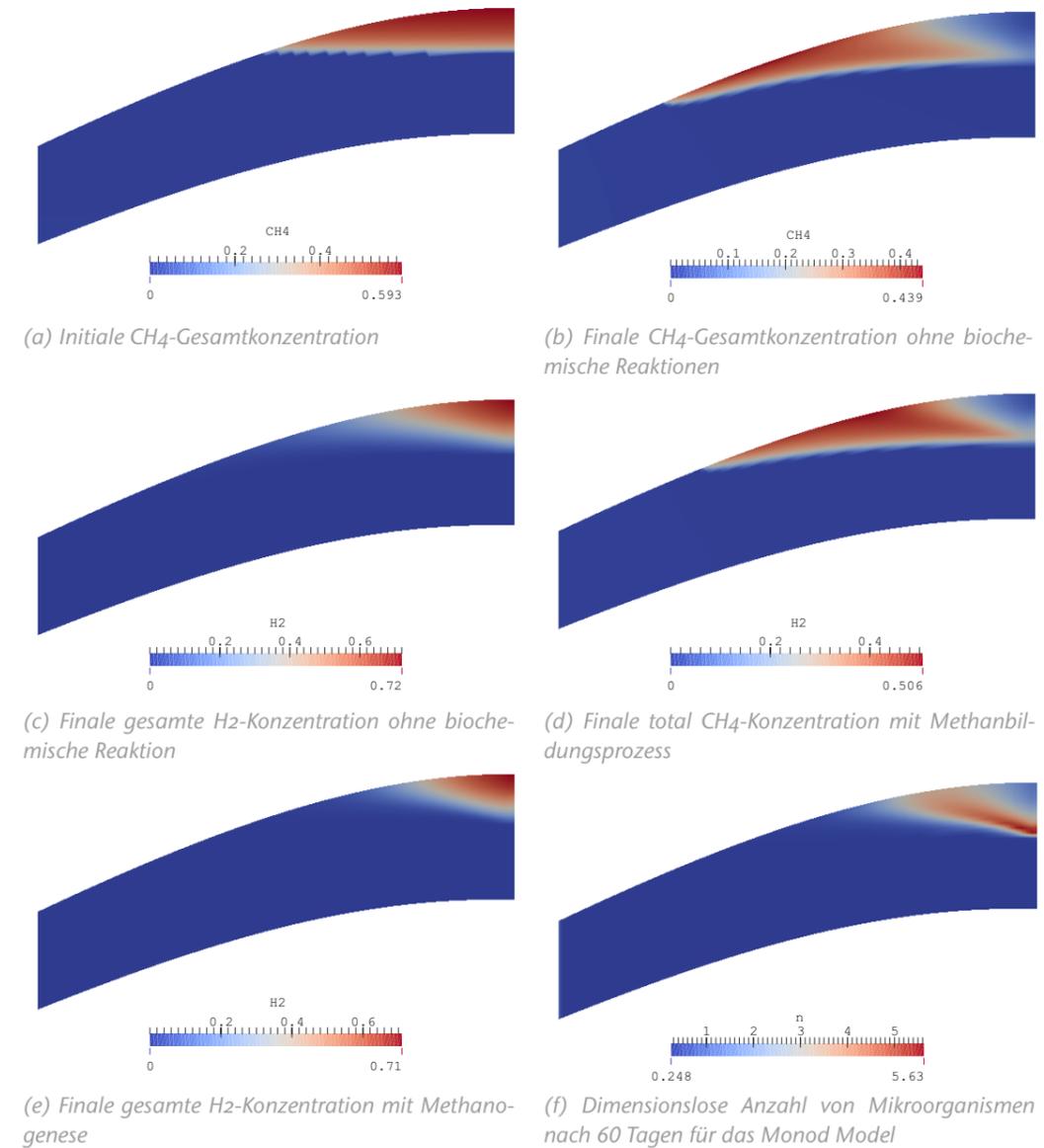


Abbildung 5: Gekoppelte biochemische und hydrodynamische Simulation der Wasserstoffinjektion in eine zweidimensionale antiklinale Struktur

Im TP2 der TU Clausthal, dem Energieforschungszentrum Niedersachsen und der Universität Lorraine wurden die Ausbreitung und die dynamische Veränderung der Zusammensetzung des injizierten Wasserstoffes durch Modellierungen und numerische Simulationen zu Gasvermischungs- und reaktiven Transportprozessen erfasst. Hierbei wurden auch die Populationsdynamik mikrobieller Komponenten und die hydraulische Instabilität in solchen Systemen berücksichtigt (Abbildung 4).

Mögliche Einflüsse von bio-chemischen Reaktionen zwischen gestein-organischen Bestandtei-

len-Lagerstättenfluiden und Wasserstoff, sowie der biogenen Rückkoppelungen zwischen veränderten Fluidzusammensetzungen (und dem Mineralbestand) wurden diskutiert. Es zeigte sich unter anderem, dass bei hohen Injektionsraten die Verdrängung des initial vorhandenen Lagerstättenwassers instabil werden und laterale Gasfinger entstehen können, bei einer zyklischen Speicherung von reinem Wasserstoff eine Rückforderungsrate von ~ 80 bis 95 mol Prozent Wasserstoff möglich ist und es zu Ansammlungen von methanogenen Archaeen kommen kann, die den Wasserstoff (teilweise) in Methan umsetzen können (Abbildung 5).

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Verbundvorhaben 01127946/1 H2STORE: TP1 ‚Gekoppelte geohydraulische und mineralogisch-geochemische Prozesse im Reservoir- und Deckgestein‘ – TP2 ‚Numerische Simulation von Gasvermischungsprozessen während der Wasserstoffspeicherung‘

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

### Förderzeitraum:

01.08.2012 – 31.12.2015

### Förderkennzeichen:

03SF0434C

### Ausführende Stellen:

Technische Universität Clausthal – Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften – Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, Clausthal-Zellerfeld; Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

### Verantw. Projektleiter:

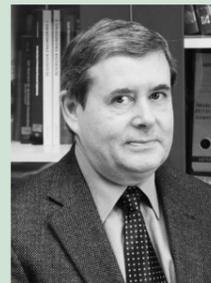
Prof. Dr. Leonhard Ganzer

### Projektkoordinator:

Dr. Viktor Reitenbach,  
E-Mail: viktor.reitenbach@tu-clausthal.de



Leonhard Ganzer



Viktor Reitenbach

Während und nach dem Abschluss der Teilprojekte TP1 und TP2 wurden von den Wissenschaftlern des TU Clausthal und EFZN Teams 26 Publikationen auf internationalen Konferenzen und in „Peer-Reviewed“ Zeitschriften veröffentlicht. Es wurden drei Master und Bachelorarbeiten angefertigt und eine internationale (deutsch-französische) Promotion erfolgte. Es wurden internationale Partnerschaften mit den Forschungsteams der Universität de Lorraine (Frankreich), der Universitäten Sichuan, sowie Forschungsvorhaben „Underground Sun Storage“ (RAG Österreich) und HYCHICO S.A. (Buenos Aires, Argentinien) entwickelt. Es wurde auf Basis des H2STORE Projektes ein weiteres Verbundprojekt HyINTEGRER konzipiert, das zur Zeit durch das BMWi gefördert und von den Partnern des H2STORE Forschungsverbands bearbeitet wird. Für die weiteren Details dazu wird auf das Abschlussbericht des Verbundprojektes H2STORE verwiesen.

Die Friedrich-Schiller-Universität Jena untersuchte in TP3 vor allem die mineralogisch-geo-/hydrochemischen Eigenschaften der Sandsteine und der mit ihnen assoziierten Porenwässer und führte numerische Simulationen unter anderem hinsichtlich der Veränderung des Porenraums beziehungsweise zum Fluidtransport aus mikrotomographischen Datensätzen durch. Diese Untersuchungen vor und nach den Laborversuchen belegten, dass bei bestimmten Bedingungen Wasserstoff Mineralreaktionen beziehungsweise Minerallösungen fördern kann, während solche Phänomene an anderen Standorten und damit unter anderen, weniger extremen Bedingungen nicht festgestellt wurden. Numerische Simulationen mit den erhobenen chemischen Daten mittels PHREEQC belegten, dass solche Minerallösungen unter spezifischen Reservoir-Bedingungen und durch eine Wasserstoffzugabe ausgelöst werden können. Diese Reaktionen bewirkten auch Veränderungen der petrophysikalischen Gesteins- und Reservoir-Eigenschaften und damit im Fluidtransport, wie die auch im TP1 festgestellt wurden.

Die Arbeitsgruppe „Mikrobielles GeoEngineering“ am Deutschen GeoForschungszentrum (GFZ) in Potsdam untersuchte im Teilprojekt 4 die Wechselwirkungen zwischen der H2-Speicherung und mikrobiellen Stoffwechselprozessen, um so allgemeine Aussagen zu ihrer Bedeutung für die Speicherung abzuleiten. In den Versuchen zeigten sich dabei Änderungen in der Zusammensetzung, Zellzahl und Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen infolge der H2-Exposition. Hierbei konnte vor allem

die Aktivität von sulfatreduzierenden Bakterien (SRB) nachgewiesen werden, während eine Methanbildung durch methanogene Archaea ausblieb.

Das am GFZ Potsdam angesiedelte TP5 untersuchte im Wesentlichen die Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff und potenziellen Speichergesteinen am Standort Ketzin/Brandenburg. Ziel war es, mögliche Minerallösungs- oder Fällungsprozesse sowie physiko-chemische Wechselwirkungen zwischen Formationsfluiden und organischen Gesteinsbestandteilen mit Wasserstoff unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen in Autoklaven-Versuchen zu bestimmen. Dabei wurden in den Fluiden zwar chemische Veränderungen und in den Festproben Porositätsveränderungen festgestellt, diese werden aber nicht auf Reaktionen während der Experimente zurückgeführt, sondern als Artefakte der Beprobung und Messungen interpretiert. Zudem wurden Versuche zur H2-Löslichkeit in Wässern durchgeführt, die zeigten, dass Wasserstoff in salinaren Wässern eine höhere Löslichkeit besitzt, als bisher angenommen.

Die Hauptaufgabe des ebenfalls am GFZ Potsdam tätigen Teilprojektes 6 war die numerische Modellierung von Fluid-Fluid- und Fluid-Gestein-Wechselwirkungen vor allem an dem Standort Ketzin/Brandenburg. Zudem wurde die Plausibilität der in TP 5 festgestellten fehlenden oder nur in sehr geringem Maße vorhandenen Elementveränderungen infolge der durchgeführten Autoklavenversuche an Probenmaterial aus dem Standort Ketzin durch geochemische Modellierungen überprüft. Diese numerischen Simulationen ergaben,

dass unter den Standortbedingungen von Ketzin lediglich eine Reduzierung von Pyrit (FeS<sub>2</sub>) zu Pyrrhotite (FeS) stattfinden kann, diese jedoch kinetisch so gehemmt ist, dass sie für die Betriebsdauer eines dortigen H<sub>2</sub>-Speichers ohne große Bedeutung wäre. Dies gilt jedoch nur bei Berücksichtigung von ausschließlich abiotischen Reaktionen und nur für den Standort Ketzin. Unter Einbeziehung möglicher mikrobiologischer Aktivitäten und unter anderen Reservoir-Bedingungen beziehungsweise an anderen Lokationen muss diese Aussage noch überprüft werden.

### Quellen

Internetpräsentationen des H2STORE Projektes unter:

1. [http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/analysen/projekt-einzelansicht//Wasserstoff\\_unter\\_Tage\\_speichern/](http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/analysen/projekt-einzelansicht//Wasserstoff_unter_Tage_speichern/) (Zugriff am 21.09.2017)
2. <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=2720904&v=10&q=H2STORE> (Zugriff am 21.09.2017)
3. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben 01127946/1 H2STORE: TP1 ‚Gekoppelte geohydraulische und mineralogisch-geochemische Prozesse im Reservoir- und Deckgestein‘ – TP2 ‚Numerische Simulation von Gasvermischungsprozessen während der Wasserstoffspeicherung‘. Förderkennzeichen: 03SF0434C, Berichtszeitraum: 01.08.2012 bis 31.12.2015, Technische Universität Clausthal, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, Juli 2016

# Verbundprojekt HyINTEGER

## Kurzfassung

Im Projekt H2STORE fanden Wissenschaftler heraus, dass Wasserstoff unter spezifischen Bedingungen Gesteinsveränderungen hervorrufen kann. Allerdings kann das Gas auch in anderen Materialien, wie etwa Stahllegierungen, Alterationen verursachen. Daher untersuchen die Forscher im Folgeprojekt HyINTEGER nun das Zusammenspiel zwischen den Wasserstoff, technischen Komponenten und den natürlichen Reservoir-Bestandteilen. Das soll helfen, eine längerfristige Speicherung von Energie zu ermöglichen.

## Abstract

In the H2STORE project the researchers have found out that the hydrogen in an underground porous formation at particular conditions can

### Projektforschungsstellen und Verbundpartner

- Friedrich Schiller Universität Jena (Prof. Dr. Heubeck)
- Technische Universität Clausthal (Prof. Dr. Ganzer) und Université de Lorraine, Frankreich (Prof. Dr. Panfilov)
- Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (Prof. Dr. Würdemann)
- Johannes Gutenberg-Universität Mainz (Prof. Dr. Kersten)

Verbundkoordination –  
Prof. Dr. Heubeck und Dr. Pudlo

### Industriepartner

- KBB Underground Technologies GmbH, Hannover
- Uniper Energy Storage GmbH, Essen,
- Rohöl-Aufsuchungs Aktiengesellschaft (RAG), Österreich
- innogy Gas Storage NWE GmbH, Dortmund
- HYCHICO S.A., Buenos Aires, Argentinien
- Storengy S.A., Frankreich

cause alteration of reservoir rocks. Moreover, the hydrogen gas can also alter materials as for instance steel alloys used for completion of the underground storage wells. Therefore, in the follow-up project HyINTEGER the researchers investigate the interactions between the hydrogen, components of technical installations and rocks in the near wellbore area. This research should reveal possible issues and facilitate the implementation of the underground storage of energy in future.

## Verbundprojekt HyINTEGER

Das HyINTEGER-Vorhaben baut auf den Ergebnissen des vorangegangenen H2STORE-Projektes auf. In diesem Projekt wurde der Einfluss einer Wasserstoffspeicherung auf Gesteine potentieller Porenreservoirs (Sandsteinhorizonte) im geologischen Untergrund untersucht. Diese Arbeiten zeigten, dass Wasserstoff unter spezifischen Bedingungen Gesteinsveränderungen bedingen kann. Auch in anderen Materialien, wie beispielsweise Stahl, Bohrlochzement und Elastomerdichtungen, kann es möglicherweise Alterationen hervorrufen. Daher untersuchen Forscher in HyINTEGER die Interaktion zwischen den technischen Komponenten und den natürlichen Reservoir-Bestandteilen (Gesteinen und Porenfluiden) unter Druck- und Temperaturbedingungen in wasserstoffführenden Umgebungen. Hierzu sind Laborexperimente geplant, die unter standortspezifischen Bedingungen mit verschiedenen Gasphasen ( $H_2$ ,  $H_2-CH_4$ ,  $H_2-CO_2$ ,  $CO_2$ ) durchgeführt werden. Dabei sollen unter anderem mineralogisch-chemische, petrophysikalische und mikrobiologische Parameter betrachtet, deren Einfluss etwa auf die Reservoir-Eigenschaften, die Sicherheit (Dichtigkeit) der Speicher und den Fluidfluss im Reservoir und entlang der Bohrlöcher evaluiert werden. Das soll eine Abschätzung von Leckagerisiken bei zyklischen Wasserstoffein- und -ausspeisungen und der Integrität von Bohrungen und Speichern ermöglichen.

## Forschungsfokus

Übergeordnet wollen die Forscher untersuchen, inwieweit eine Wasserstoffspeicherung in unterirdischen geologischen Porenreservoirs mög-

lich ist, um eine längerfristige Speicherung von Energie zu ermöglichen. Eine solche Beurteilung setzt voraus, dass der eingespeiste Wasserstoff beziehungsweise wasserstoffführende Gasphasen unter anderem sicher, das heißt ohne unkontrollierten Austritt zur Oberfläche, also ohne Leckagerisiko und damit ohne Umweltschädigungen eingelagert werden können. Die Rückförderungsraten müssen ökonomisch darstellbar sein. Zudem müssen diese Reservoirs über längere Zeiträume, das heißt über mehrere Ein- und Ausspeisezyklen hinweg unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten betrieben werden können.

Diese drei Aspekte werden innerhalb von HyINTEGER betrachtet, insbesondere Leckagerisiken entlang von Bohrungen, mineralogisch-chemische und mikrobiologische Reaktionen im Reservoir und entlang der Bohrungen sowie Gasvermischungsprozesse im Reservoir.

## Projektstatus

Die Schwerpunkte und Arbeitsschritte der fünf beteiligten Teilprojekte können in folgende Hauptpunkte unterteilt werden:

1. Probenselektion bei projektunterstützten Industriepartnern vor Ort. Dieses Probenmaterial umfasst neben Bohrkernmaterial auch Teile der Bohrlochverrohrung und -versiegelung, wie Stahllegierungen, Bohrlochzemente und Elastomerverbindungen. Obwohl dieser Punkt soweit abgeschlossen ist, stellt die Industrie während der Projektlaufzeit gegebenenfalls noch weiteres Material zur Verfügung.
2. Bau von Versuchseinrichtungen (Autoklaven) und Umbau von Laborräumen um die (sicherheitstechnischen) Anforderungen zur Durchführung der geplanten Experimente zu gewährleisten. Inzwischen ist dieser Punkt abgeschlossen. Herstellung von Verbundproben aus den in 1.) genannten verschiedenen Materialkomponenten für die geplanten Versuche. Eine Reihe von Verbundproben wurde bereits angefertigt, weitere Verbundproben sind noch in Arbeit (vergl. Punkt 1).
4. Mineralogische, chemische, mikrobiologische, physikalische und petrophysikalische Charakterisierung des Probenmaterials, wobei Proben, die in Laborexperimenten genutzt werden sollen (siehe nächsten Punkt) besonders detailliert untersucht werden/wurden. Dieser Punkt ist noch nicht vollständig abgeschlossen.
5. Durchführung von Laborexperimenten mit den Schwerpunkten zur Evaluierung möglicher mineralogischer, chemischer, mikrobiologischer und petrophysikalischer Veränderungen des Probenmaterials durch die gewählten Versuchsbedingungen und möglicher (unterschiedlicher) Wechselwirkungen zwischen den Materialkomponenten während der Experimente. Diese Versuche werden unter den druck- und temperatur-spezifischen Bedingungen der Speicherstandorte mit verschiedenen Gasphasen ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2-CO_2$ ,  $H_2-CH_4$ ) und standortspezifischen Formationsfluidzusammensetzungen durchgeführt. – Mit diesen Arbeiten wurde begonnen.
6. Untersuchung des Probenmaterials (an identischen Proben und mit gleichen Analysemethoden), welches in den Versuchen verwendet wurde und Interpretation der Datensätze hinsichtlich möglicherweise stattgefundener Reaktionen; als Bezugspunkt dienen hier die in Punkt 4. erhobenen Daten. Weitergabe dieser Informationen und Daten an die betroffenen Arbeitsgruppen für deren numerische Simulationen. Dieser Punkt wird sukzessive mit dem Abschluss der jeweiligen Versuchsreihen erfüllt, wobei mit ersten Ergebnissen im Sommer 2017 zu rechnen ist.
7. Durchführung numerischer Simulationen (Modellierungen) zu den Komplexen (a) Ausbreitung von Gasphasen im Untergrund, (b) Auswirkungen zyklischer Ein- und Ausspeiseoperationen von Gasphasen auf das Reservoir und die Bohrung, (c) Alteration von Reservoirgesteinen, Bohrlochzementen, Stählen und Elastomeren, (d) Verhalten von Biozönosen bei unterschiedlichen Untergrundbedingungen und in unterschiedlichen Gaszusammensetzungen, (e) dem Einfluss von Biofilmen auf die effektiven hydraulischen Reservoirparameter (Porosität, Permeabilität), (f) Veränderung der Reservoir-Eigenschaften, besonders hinsichtlich der Fluidwegsamkeiten und in diesem Zusammenhang (g) Auswirkungen einer Alteration (zum Beispiel Minerallösung, Materialversprödung, Korrosion) der Bohrlochkomponenten hinsichtlich der Sicherheit/Dichtigkeit von Wasserstoffspeichern (Abschätzung eines Leckagerisikos entlang des Bohrloches). – Theoretische Betrachtungen zu diesen Punkten wurden bereits durchgeführt, erste standortspezifische, auf den Versuchsergebnissen aufbauende Modellierungen sind für den bis etwa Herbst 2017 zu erwarten.

### Teilvorhaben der Technischen Universität Clausthal

Im Teilvorhaben TP 2 der Technischen Universität Clausthal werden petrophysikalische Untersuchungen und Hochdruck-Hochtemperatur (HPHT)-Experimente zu den Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff, Reservoir-Gestein, Verrohrung und Zement von Untergrundspeicher-Bohrungen durchgeführt. Dazu wird das zu testende Material in-situ Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt. Die an den Test-Proben vorgenommenen Untersuchungen sollen die durch geochemische Wechselwirkungen hervorgerufenen Änderungen der petrophysikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien aufzeigen. Die Untersuchungen sollen Aussagen über die Eignung der geprüften Materialien für die Verwendung unter den bei Wasserstoffspeicherung herrschenden Einsatzbedingungen ermöglichen.

### Aufbau der Versuchsanlagen

Die Aufrüstung der Laboratorien für Wasserstoffanwendungen erfordert vor allem sicherheitstechnische Anpassungen der bestehenden Messeinrichtung. Autoklaven für  $H_2$ -Experimente und mit in Wasser gelöstem  $H_2S$  oder Essigsäure müssen unter Aspekten der notwendigen Sicherheit gebaut werden, um die für die Langzeitversuche erforderlichen Anforderungen und Kapazitäten zu gewährleisten.

### Herstellung von Probekörpern

Die Verbundzementproben repräsentieren Verbund der Futterrohrtour einer UGS Bohrung mit dem Verbundzement, Deck- und Reservoirgestein. Von besonderem Interesse ist hier die

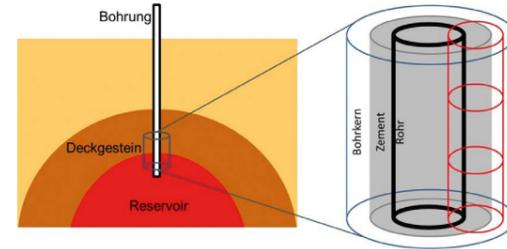


Abbildung 2: Charakterisierung der technischen Integrität im bohrlochnahen Bereich (oben) und die dafür hergestellten Probekörper (unten)

Herstellung von Verbundprobekörpern, also Proben, die aus Zement und Gestein beziehungsweise Stahl und Zement zusammengesetzt sind. Daneben sollen auch reine Zementplugs hergestellt werden.

### Charakterisierung der Proben vor den Autoklavenexperimenten

Die Charakterisierung beinhaltet die Bestimmung der Porosität, Durchlässigkeit und Dichte. Dies wird an den Proben jeweils vor und nach den Autoklavenexperimenten durchgeführt, um die Proben auf durch die Behandlung im Autoklav verursachte Veränderungen zu untersuchen.



Abbildung 1: Messeinrichtung mit der Permeabilitätsmessanlage für die Messung der Permeabilität der Probekörper unter Reservoirbedingungen (links) und den explosionsgeschützten HPHT Autoklaven für Wasserstoffexperimente (rechts).



Abbildung 3: Gaspycnometer AccuPyc 1340 für die Bestimmung der Porosität von Gesteinsprobekörpern unter Laborbedingungen (links) und Gaspermeameter SYROPERM für die Bestimmung der Permeabilität der Probekörper unter Laborbedingungen (rechts)

### Autoklavenexperimente

In den Autoklaven werden die Probekörper unter HPHT Bedingungen Wasserstoff und Lagerstättenfluid mit den gelöstem  $H_2S$ ,  $CO_2$  und Essigsäure ausgesetzt. Diese Versuche laufen bis zu sechs Monaten. Veränderungen in der Dichtheit des Verbundes werden mithilfe von Permeabilitätsmessungen und den mineralogisch-geochemischen und mikrotomographischen Untersuchungen in den Teilprojekten TP 1 und TP 5 untersucht.

Herkömmliche Softwarepakete für die Simulation von Strömungsprozessen in Untergrundreservoirs sind nicht in der Lage, die mikrobiellen Stoffwechselprozesse und das damit verbundene Wachstum von Biofilmen zu berücksichtigen. Deshalb ist im Teilprojekt 4 die Entwicklung von geeigneten gekoppelten mathematischen Modellen, die numerische Umsetzung und



Abbildung 4: Prototyp des HPHT Autoklavs in der explosionsgeschützten Ausführung für Wasserstoffanwendungen (H2STORE Projekt) und Aufbau einer neuen HPHT Zelle

Durchführung von exemplarischen Simulationsstudien geplant. Für den Bohrungsnahbereich soll ein Modell für die Ablösung und den Transport von Biofilmen und die daraus resultierende Veränderung der effektiven Porosität und Permeabilität entwickelt werden. Weitere Simulationen sollen Aussagen über die mikrobiell induzierten Schwankungen der Gaszusammensetzung im Feldmaßstab machen.

### Entwicklung eines gekoppelten konzeptionellen Modells des Zweiphasenflusses von Gas und Wasser mit Biofilmauflösung, Transport und Porenhalsverstopfung für den Sondennahbereich

Zuerst soll ein theoretisches Modell für das Biofilmwachstum und die Ablösung im Maßstab einer einzelnen Pore entwickelt werden. Das System des Polymernetzwerks zusammen mit Bakterien wird als Fluidphase mit nicht-newtonischen Eigenschaften modelliert. Daten für die Validierung des Modells wurden an der Universität Lorraine an einem neu entwickelten Versuchsaufbau erhalten.

Auf größerem Maßstab kann der Effekt der Porenhalsverstopfung mit Hilfe des stochastischen Smoluchowskimodells der Partikelansammlung beschrieben werden. Biofilmenteile, die hingegen die Größenordnung von Poren haben, können nicht als Kolloiden berücksichtigt werden. Ein anderes mathematisches Modell, bei dem die Porenhalsverstopfung als Partikelansammlungsterm erscheint, muss hierfür entwickelt werden.

Verschiedene Varianten des theoretischen Modells sollen analytisch beziehungsweise numerisch gelöst werden. Das Modell, welches das Verhalten im Sondennahbereich am besten beschreibt, soll ausgewählt werden, um es an einer einzelnen Bohrung zu untersuchen. Dabei werden die experimentell bestimmten Parameter genutzt, um erste Vorhersagen über die Veränderung der Permeabilität beziehungsweise der Bohrlochinjektivität zu machen.

### Simulation des Mehrphasenflusses in Porenspeichern im Feldmaßstab

Im Rahmen von Vorarbeiten wurde bereits ein numerischer Code auf der Basis von DuMuX erstellt, der in der Lage ist, die hydrodynamischen Prozesse gekoppelt mit einer biochemi-

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Verbundvorhaben HyINTEGER:  
Untersuchungen zur Integrität von Bohrungen und technischen Materialien in geologischen H<sub>2</sub>-Untergrundreservoirs;  
Teilprojekt: Experimentelle und numerische Untersuchungen der technischen Integrität von UGS-Bohrungen

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi.IIC6)

### Förderzeitraum:

01.01.2016–31.12.2018

### Förderkennzeichen:

03ET6073B

### Projektlaufzeit:

Januar 2016 bis Dezember 2018

### Ausführende Stelle:

Technische Universität Clausthal – Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften – Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, Clausthal-Zellerfeld, Niedersachsen

### Leistungsplansystematik:

Wasserstoffspeicher, geologisch [EA2226]

### Projektträger:

Forschungszentrum Jülich GmbH (PT-J.ESI3)

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr. Leonhard Ganzer

### Projektkoordinator:

Dr. Viktor Reitenbach

E-Mail: viktor.reitenbach@tu-clausthal.de



Leonhard Ganzer



Viktor Reitenbach

schen Reaktion (Methanogenese) zu simulieren. Im aktuellen Projekt wurde der numerische Code so erweitert, dass die Simulation von mehreren gleichzeitig stattfindenden biochemischen Reaktionen möglich ist. Berücksichtigt werden dabei zusätzlich Homoacetogenese und Sulfatreduktion (Abbildung 5–6). Für umfangreiche Simulationen mit mehr als einer Millionen Freiheitsgrade wurde der numerische Code erfolgreich auf dem Hochleistungsrechner Nord getestet. Die Testläufe zeigten eine effiziente Skalierbarkeit auf mehr als 100 Prozessoren.

In den nächsten Schritten ist ein Upscaling des entwickelten Modells für den Sondennahbereich vorzunehmen. Wichtig ist dabei, dass die Veränderung der Injektivität beziehungsweise Produktivität auch im Feldmaßstab in die Simulationen eingebunden werden kann.

Für die numerischen Simulationen im Feldmaßstab können geologische Modelle von verschiedenen Lagerstätten genutzt werden. Die Speicherzyklen sollen abwechselnde Injektion-, Leerlauf- und Produktionsphasen haben. Anhand der Simulationsstudien sollen Aussagen zu Schwankungen der Gaszusammensetzung über die Zeit in porösen Speichern gemacht werden. Ebenfalls sollen Aussagen zu möglichen Leckageraten durch das Deckgestein gemacht werden.

Für die Einzelheiten zum Verlauf des Vorhabens und die Publikationen der Forschungsteams wird auf die Internetpräsentation des Projektes [1], [2] verwiesen.

## Quellen

Internetpräsentationen des HyINTEGER Projektes unter:

1. [http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/analysen/projekt-einzelansicht/54/Wasserstoff\\_langfristig\\_unterirdisch\\_speichern/](http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/analysen/projekt-einzelansicht/54/Wasserstoff_langfristig_unterirdisch_speichern/) (Zugriff am 22.09.2017)
2. <https://www.hyinteger.com/teilprojekte/technische-universitaet-clausthal-1/> (Zugriff am 22.09.2017)
3. Zwischenbericht zum Vorhaben HyINTEGER; Teilprojekt: Experimentelle (TP 2) und numerische (TP 4) Untersuchungen der technischen Integrität von UGS-Bohrungen. Förderkennzeichen: 03ET6073B, Berichtszeitraum: 01.07.2016–31.12.2016, TU Clausthal, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, März 2017.

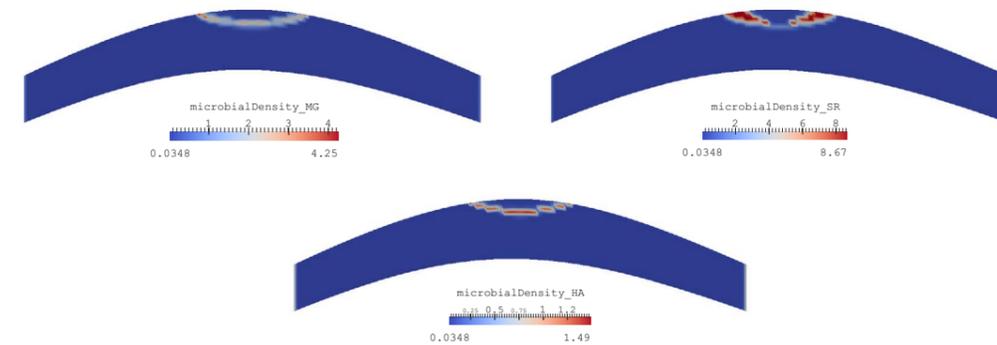


Abbildung 5: Mikrobielle Dichte von methanogenen Archaeen (oben links), sulfatreduzierenden Bakterien (oben rechts) und homoacetogenen Archaeen (unten)

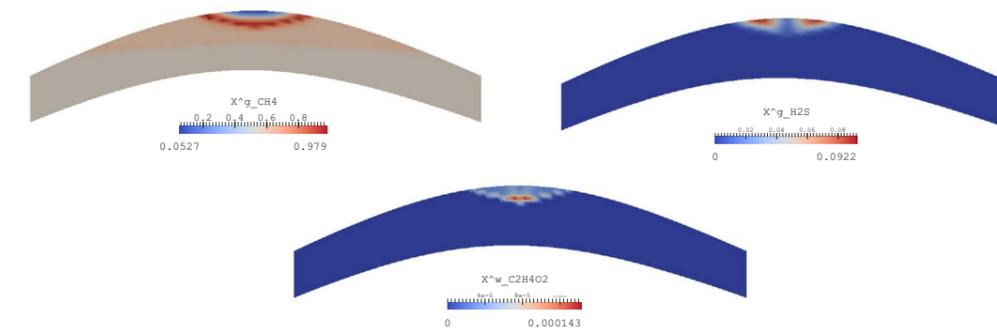


Abbildung 6: Methankonzentration in der Gasphase (oben links), Schwefelwasserstoffkonzentration in der Gasphase (oben rechts) und Essigsäurekonzentration in der Wasserphase (unten)

## Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch (OBS)

### Kurzfassung

#### Was ist OBS?

Das Projekt OBS ist ein vom BMWi gefördertes Verbundvorhaben zwischen dem Drilling Simulator Celle der TU Clausthal und dem Institut für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig.

#### Was wollen wir?

Im Rahmen der angestrebten Reduzierung von Kohlendioxidemissionen in die Atmosphäre wird verstärkt nach alternativen Energieformen gesucht. Im Gegensatz zu Windenergie und Photovoltaik bietet Geothermie dabei den Vorteil einer grundlastfähigen und kontinuierlichen Verfügbarkeit. Neben der Stromerzeugung ist auch die direkte Nutzung der Geothermie für Wärmezwecke von besonderer Bedeutung.

Das Ziel des OBS Projekts ist die Untersuchung der lateralen, axialen und torsionalen Bohrstrangschwingungen, um Aufschluss darüber zu gewinnen, wie Bohrungen auf tiefe Geothermie, die oftmals Störungszonen durchbohren, optimiert werden können. Leider ist es nur schwer möglich, geeignete Messdaten in Feldversuchen zu erlangen. Daher wird am Drilling Simulator Celle im Rahmen des OBS Projekts ein weltweit einzigartiger, horizontaler, Bohrprüfstand im Originalmaßstab aufgebaut, in dem die letzten 20 m eines Bohrstrangs untersucht werden können. Die Rohrstrecke, die oberhalb dieser 20 m in der Realität existieren würde, wird durch eine zu entwickelnde mehrachsige Aktuatorik nachgebildet. Algorithmen

### Projektpartner

- TU Braunschweig, Institut für Dynamik und Schwingungen

und Software werden vom Institut für Dynamik und Schwingungen (IDS) der TU Braunschweig beigesteuert. Auf diese Weise können die Einflüsse des Gesamtbohrstrangs durch die Aktuatorik am Prüfstand simuliert werden.

### Abstract

#### What is the OBS Project?

The OBS Project is a joint research project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. It is a collaboration between the Drilling Simulator Celle, an institute of Clausthal University of Technology, and the Institute for Dynamics and Vibrations from Braunschweig University of Technology.

#### What is the purpose?

Striving to reduce the carbon dioxide emissions in the atmosphere leads to increased research for alternative energy sources. Geothermal energy, in contrast to photovoltaic and wind energy, is in itself a source of high reliability and continuous availability. Not limited only to electricity production, geothermal energy can be of direct use for several heating related purposes.

The aim of the OBS project is to study the vibrations of the drillstring in the lateral, axial and torsional directions in order to optimize the drilling process for deep geothermal wells, which often have to be drilled in fault zones. Since it is very difficult to achieve precise and accurate results from field tests, a unique full-scale horizontal drilling test stand will be built within the framework of OBS. In it the dynamics of the last 20 m of the drillstring will be investigated and analyzed during the drilling process. The corresponding forces from the upper part of the drillstring will be introduced at the location where the last 20 m is cut out using a specially designed multiaxial actuator system. These forces would be calculated in a real-time simulation prepared by the Institute of Dynamics and Vibrations (IDS) of the Braunschweig University of Technology. This would yield a real-time dynamic examination taking into con-



sideration the whole drillstring from the bottom hole to the surface.

### Was ist zu tun?

Im Rahmen des Projektes muss der bereits vorhandene Prüfstand am DSC erweitert werden. Dazu zählen folgende Kernaufgaben:

- Entwicklung einer druckfesten Gesteinskammer
- Entwicklung eines Konzeptes für die Schwingungsanregung basierend auf den Modellen des IDS
- Entwicklung eines Messtechnikkonzeptes zur Bestimmung der Bohrstrangdynamik

Durch die Modifikation des Prüfstandes wird es möglich, die Dynamik von Bohrsträngen in Echtzeit zu messen und zu analysieren. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Optimierung des Bohrfortschritts, der Bohrungssicherheit und bilden die Grundlage für spätere aktive und passive Systeme zur Reduzierung der unerwünschten Schwingungen.

### Was haben wir bisher erreicht?

Im bisherigen Projektverlauf wurden diverse Konzepte für die Gesteinskammer, die Schwingungsanregung und die Messtechnik erarbeitet und bewertet.

Die Beschaffung einer modularen, wiederverwendbaren Gesteinskammer wird bis auf weiteres nicht weiterverfolgt, da hier bezüglich der Handhabung der Gesteinsproben noch Unklarheiten bestehen. Zur Inbetriebnahme des bestehenden Bohrprüfstands soll daher zunächst eine Einmalkammer verwendet werden. Mit dieser werden erste Tests zum Verhalten des Bohrprüfstands in seiner aktuellen Grundkonfiguration durchgeführt. Wenn sich das Konzept einer Einmalkammer als erfolgreich erweist, könnte es auch für das OBS Projekt in ähnlicher Form eingesetzt werden.

Für die Erstellung der Modelle sowie die spätere Durchführung und Auswertung von Versuchen ist es notwendig, eine „Musterbohrung“ zu definieren. Diese wurde auf Grundlage der Untersuchungen im Rahmen des gebo Projekts



## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Optimierung des Bohrfortschritts für tiefe Geothermiebohrungen durch systematische Analyse untertägiger Schwingungen im Laborversuch

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

0324115

### Projektlaufzeit:

01.08.2016 – 31.01.2020

### Bearbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Oppelt

### Projektkoordinator:

Lisette Hayn,  
lisette.hayn@tu-clausthal.de



Joachim Oppelt



Lisette Hayn

erstellt und beinhaltet alle Parameter, die zur Erstellung von Bohrmodellen notwendig sind. Einige Beispiele dafür sind die Konfiguration der Bottom Hole Assembly, Gesteinsformationen sowie die Bohrtrajektorie.

Die Schwingungsanregung des Bohrstrangs stellt die Verknüpfung des Prüfstandes mit dem virtuellen Bohrstrangmodell her. Das hierzu erarbeitete Konzept sieht den Einsatz eines hydraulischen Hexapoden als Aktuator vor. Die Einbringung von Schwingungen in den Bohrstrang erfordert den Einsatz einer multiaxialen Ausgleichkupplung zum Schutz des bestehenden Prüfstandes, sowie einer beweglichen Dichtung. Die Dichtung muss die Bewegungen des Bohrstranges zulassen und zeitgleich dem Bohrspülungsdruck in der Anlage standhalten. Das Konzept für die Messtechnik sieht die Einbringung von Sensorik im Bohrstrang vor. Dies ist verknüpft mit extremen Anforderungen, wie eine Begrenzung des Bauraums auf drei Zoll, Volumenströme im Bohrstrang bis zu 3000 l/min, Drücke bis 200 bar und Temperaturen von bis zu 80 °C. Durch die Rotation des Bohrstrangs um die eigene Achse wird die Messdatenübertragung aus dem Bohrstrang heraus zusätzlich erschwert. Nach dem derzeitigen Stand wird die Datenübertragung innerhalb des Bohrstrangs über Kabel realisiert. Aus dem Bohrstrang heraus werden die Daten per Drahtloskommunikation übertragen.

## Alkalische Wasserelektrolyse

### Kurzfassung

Eine Schlüsseltechnologie für das Power-to-Gas-Konzept stellt die Wasserelektrolyse zur Bereitstellung von Wasserstoff dar. Zur Umsetzung und Intensivierung des Power-to-Gas-Konzeptes sind genaue Kenntnisse über das dynamische Verhalten des Elektrolyseprozesses unerlässlich. So ist beispielsweise die Teillastfähigkeit einer alkalischen Wasserelektrolyse gegenwärtig auf etwa 10 bis 40 Prozent der Nominallast begrenzt. Unterhalb dieses Betriebsbereiches verringert sich die Gasqualität des Wasserstoffs maßgeblich durch Kontamination des ebenfalls im Prozess entstehenden Sauerstoffs. Da für die erfolgreiche Speicherung erneuerbarer Energie sowohl der Teillastbetrieb als auch die dynamische Betriebsweise des Elektrolyseurs notwendig ist, wurden am Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik theoretische und experimentelle Untersuchungen angestellt, um die wichtigsten Prozessparameter zur Optimierung der Gasqualität zu identifizieren.

Neben der Untersuchung der Prozessparameter wird am ICVT an der Weiterentwicklung und Verbesserung der Stabilität von Katalysatoren, der Bestimmung der intrinsischen Aktivität dieser Katalysatoren, sowie dem Ablösungsverhalten der Gasblasen von der Elektrodenoberfläche geforscht. Insbesondere die anodische Sauerstoffentwicklung ist aufgrund der langsamen Kinetik und der unzureichenden Stabilität einiger Katalysatoren Gegenstand aktueller Untersuchungen. Durch moderne Fertigungstechniken wie der Ultrakurzpulslaserablation werden Oberflächen zielgerichtet strukturiert und unterschiedliche Katalysatoren appliziert.

### Abstract

For realization and improvement of the power-to-gas-concept precise knowledge especially about the dynamic behavior of the water electrolysis process is indispensable. The acceptable part-load operation of an alkaline water electrolyzer is typically limited to about 10 – 40 % of the nominal load. Below this working range the hydrogen quality is significantly reduced through contamination of oxygen, which is also being produced in the process. Since part-

load and dynamic operation of the electrolyzer is required for the storage of intermittent renewable energy, we carried out an extensive experimental and theoretical study regarding the influence of the most important operational parameters on the gas purity during alkaline water electrolysis.

Besides the investigation of process conditions, our research focusses on the further development to improve the catalyst stability, the intrinsic activity and the bubble detachment from the electrodes. Especially the oxygen evolution reaction is the bottleneck in the water electrolysis process due to its slow kinetics and insufficient stability of some catalysts. Therefore modern manufacturing technologies, like ultra-short pulse laser ablation, are used for a tailored micro and nano structuring of the electrode surfaces and for the application of different catalysts.

### Aktueller Projektstand

Für die Umsetzung des Power-to-Gas-Konzeptes ist die Entwicklung effizienter Energiespeicher erforderlich, die in der Lage sind, den fluktuierenden und intermittierenden Anfall elektrischer Energie aus regenerativen Quellen zu kompensieren. Während kleine Energiemengen kurzfristig in Batterien, Schwungrädern oder Superkondensatoren gespeichert werden können, eignet sich die chemische Speicherung in Form von Wasserstoff oder Methan insbesondere für die Langzeitspeicherung sehr großer Energiemengen. Die Bereitstellung dieses Wasserstoffs erfolgt im Power-to-Gas-Konzept durch eine Wasserelektrolyse.

Eine technologische Variante der Wasserelektrolyse stellt hierbei die alkalische Wasserelek-

### Projektpartner

- Dr. Lars Röntsch und Dr. Christian I. Müller, Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), Dresden

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**  
Produktgasqualität in der alkalischen Wasserelektrolyse

**Finanzierung:**  
Institut für chemische und elektrochemische Verfahrenstechnik

**Laufzeit:**  
07/2014 – 06/2018

**Partner:**  
Prof. Hanke-Rauschenbach, IfES Hannover

**Bearbeiter:**  
Phillip Haug

**Projektleiter:**  
Prof. Thomas Turek

**Vorhabensbezeichnung:**  
Laserstrukturierte Elektroden

**Finanzierung:**  
Energie-Forschungszentrum der TU Clausthal / Institut für chemische und elektrochemische Verfahrenstechnik

**Partner:**  
Fraunhofer HHI, Abteilung Faseroptische Sensorsysteme

**Bearbeiter:**  
Matthias Koj

**Projektleiter:**  
Dr. Thomas Gimpel  
(Prof. Wolfgang Schade)

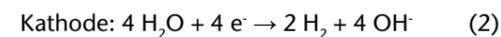


Thomas Gimpel



Matthias Koj

trolyse dar, welche typischerweise aus zwei Nickel-basierten Elektroden besteht, die in einen hochkonzentrierten alkalischen Elektrolyten tauchen und durch einen Separator räumlich voneinander getrennt werden. Dieser besitzt einerseits die Aufgabe, den elektrischen Stromkreis durch Bereitstellung einer möglichst hohen Ionenleitfähigkeit zu schließen und andererseits die Vermischung der gebildeten Produktgase zu vermeiden. Die an den Elektroden ablaufenden Reaktionen lauten hierbei wie folgt:



Für die Kopplung der alkalischen Wasserelektrolyse an eine erneuerbare Energiequelle sind umfangreiche Erfahrungen des dynamischen Verhaltens erforderlich, da der Teillastbetrieb der alkalischen Wasserelektrolyse durch die Hersteller in der Regel auf etwa 10 bis 40 Prozent der Nominallast begrenzt wird. Unterhalb dieses Betriebsbereichs sinkt die Gasqualität der entstehenden Produktgase durch die Verunreinigung mit dem jeweils anderen Gas drastisch ab, was zu einer sicherheitstechnischen Abschaltung der Anlage bei etwa 2 Vol.-%  $\text{H}_2$  in  $\text{O}_2$  und umgekehrt führen kann. Durch



Abbildung 1: Neuer Teststand für die alkalische Wasserelektrolyse (30 bar, 90 °C, 14 kA m<sup>2</sup>).

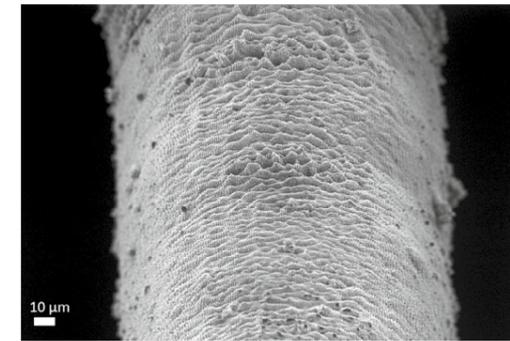
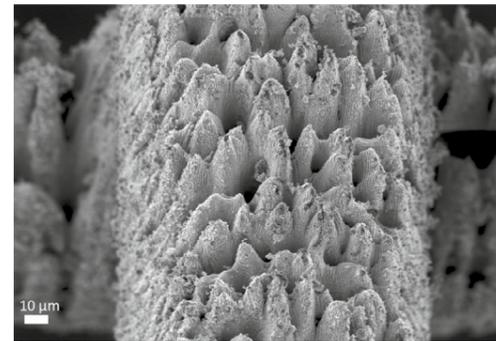


Abbildung 2: Elektronenmikroskopische Aufnahmen von gelaserten Nickelnetzen mit unterschiedlichen Strukturierungsgraden.

eine angepasste Regelung des Elektrolytvolumenstroms, der Elektrolytkreislaufführung, sowie der Prozessparameter des Elektrolyseurs lässt sich jedoch eine Verbesserung der Gasqualität im Teillastbereich erzielen.

Hierfür wird am ICVT neben der Ermittlung experimenteller Daten mittels eines Laborelektrolyseurs auch ein mathematisches Modell zur Berechnung der resultierenden Gasqualität in einem Elektrolysesystem entwickelt. Durch Parameteroptimierung ist es möglich, kritische Betriebszustände im dynamischen Betrieb zu vermeiden und somit eine höhere Systemeffizienz zu erzielen. Neben der Untersuchung der atmosphärischen Wasserelektrolyse soll in Zukunft auch die druckbetriebene Elektrolyse hinsichtlich ihres dynamischen Verhaltens optimiert werden. Dafür wurde ein neuer Elektrolyseteststand der Firma Greenlight (siehe Abbildung 1) angeschafft, der es ermöglichen wird, Wasserstoff bei einem Druck von 30 bar zu produzieren.

Neben der Untersuchung der verfahrenstechnischen Aspekte in der alkalischen Wasserelektro-

lyse wird versucht, den Zellwirkungsgrad einer alkalischen Elektrolysezelle durch gezielte Identifizierung der elektrochemischen Widerstände zu optimieren. Durch Elektrodengeometrieangepassung und Strukturierung von Elektrodenoberflächen kann die für die elektrochemische Reaktion notwendige Überspannung, sowie der ohm'sche Widerstand, welcher durch die entstehenden gasförmigen Produkte verursacht wird, reduziert werden. Die Strukturierung der Elektrodenoberfläche erfolgt durch ein Laserablationsverfahren, das aktuell am EFZ unter der Leitung von Dr. Thomas Gimpel in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI) in Goslar weiterentwickelt wird. Mit diesem Verfahren werden unterschiedliche Strukturierungsgrade, wie in Abbildung 2 dargestellt, auf die Nickelnetzelektroden aufgebracht und die Effekte auf die elektrochemischen Widerstände untersucht. Weiterhin erlaubt diese neuartige Herstellungsmethode die Fixierung von unterschiedlichen Katalysatoren in definierten Verhältnissen, welche mit konventionellen Fertigungstechniken nicht möglich sind.

# Redox-Flow Batterien

## Kurzfassung

Die Umstellung unserer Energieversorgung auf regenerative Quellen (Solar- und Windenergie) erfordert aufgrund ihres fluktuierenden Anfalls effiziente und ausreichend große Speicher für elektrische Energie, um mittelfristig die Stabilisierung des Stromnetzes gewährleisten zu können. Im Bereich der stationären Energiespeicher stellt die Redox-Flow Batterie eine vielversprechende Technologie mit einer Leistung im kW- bis MW-Bereich dar. Am Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kunz, Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek) werden am Standort EnergieCampus Goslar seit 2009 Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Redox-Flow Batterien durchgeführt. Es wurden umfassende Kompetenzen bei der Bewertung von Materialien (Elektroden, Separatoren und Dichtungen), der Bestimmung kinetischer Daten der elektrochemischen Reaktionen sowie der mathematischen Modellierung (Elektroden, Zellen und Systemen) erworben. Zudem wird das Energiespeicherkonzept, auch im Vergleich zu anderen Verfahren, technisch und ökonomisch bewertet.

## Kooperationspartner

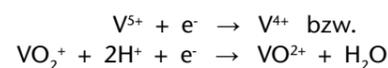
- Prof. Joachim Schmidt, Dennis Dürkop, Institut für Recycling, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften: Membranentwicklung
- Prof. Sabine Beuermann, Dr. Marco Drache, Institut für Technische Chemie, TU Clausthal: Entwicklung von polymerbasierten Membranen
- Prof. Karel Bouzek, Department of Inorganic Technology, University of Chemistry and Technology Prague: Modellbasierte Optimierung von Redox-Flow Batterien
- Prof. Dieter Kaufmann, Institut für Organische Chemie, TU Clausthal: Herstellung und Charakterisierung organischer Elektrolyte
- Prof. Arno Kwade, Institut für Partikeltechnik, TU Braunschweig: Membranentwicklung

## Abstract

The transition from conventional to renewable energies (solar, wind) requires sufficient energy storage systems, which allow to balance the fluctuations in electricity generation and can stabilize the power grid in the medium term. One suitable technology in the field of stationary energy storages is the redox-flow battery, which can provide power in the kW to MW range. The Institute of Chemical and Electrochemical Process Engineering (ICVT, Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kunz, Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek) has been carrying out research in the field of redox-flow batteries since 2009. Comprehensive expertise has been gained in materials characterization (electrodes, separators and sealings), in determination of kinetic data for the electrochemical reaction as well as in mathematical modelling (electrode, cell, and system). Furthermore, this energy storage concept is technically and economically evaluated, also in comparison to other processes.

## Redox-Flow Batterien

In Redox-Flow 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, 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:

$$V^{2+} \rightarrow V^{3+} + e^-$$

Damit ergibt sich als Summenreaktion:

$$V^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \rightarrow VO^{2+} + V^{3+} + H_2O$$

Beim Laden laufen die Reaktionen vollständig reversibel in umgekehrter Richtung ab. Ein großer Vorteil der Redox-Flow Batterien ist die Trennung von Energieinhalt, der durch die

Größe der Vorrattanks für die Elektrolytlösungen eingestellt werden kann, und Leistung, die sich durch die Fläche der Elektroden in der Zelle beziehungsweise im Zellenstapel (Stack) ergibt.

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 Redox-Flow Batterie mehr als 10.000 Zyklen erreichen, was deutlich über den heute erreichbaren Zyklenzahlen von beispielsweise Li-Ionenbatterien liegt.

Aufbauend auf früheren Erfahrungen mit Direktmethanol-Brennstoffzellen und energie-sparenden Elektrolyseverfahren mit Brennstoffzellen-Elektroden konnte das ICVT seit 2009 eine Reihe von Projekten einwerben (Tabelle 1), die in der Arbeitsgruppe des ICVT am Standort EnergieCampus Goslar durchgeführt werden.

## Ausgewählte Projektergebnisse

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

Bisher werden dem Stand der Technik nach ausschließlich Polymermembranen in Redox-Flow Batterien verwendet. Auf der Kathode ist der Elektrolyt 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, sodass 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 verwendet. Erste Ergebnisse zeigen, dass poröse Gläser eine aussichtsreiche Alternative zu polymerbasierten Membranen sein könnten. Abbildung 1 zeigt eine poröse Glasmembran auf einem mittels Rapid Prototyping hergestellten Träger.

### Industrieprojekt „Scale-up von Redox-Flow Batterien“

Ziel dieses Projektes ist es, die Zell- und Batteriekomponenten (Membranen, Filze, Elektrolyte) unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten und so eine Grundlage für den Scale-up zu schaffen. Es sollen große Zellen mit Flächen zwischen zwei und drei Quadratmeter entwickelt werden, wie sie aus der Elektrolysetechnik der chemischen Industrie bekannt sind. An den Einsatz großtechnischer Anlagen werden vielfältige Anforderungen gestellt. So werden die Einflussfaktoren der Temperatur beispielsweise auf die Elektrolytstabilität und die Leistung der Zelle insgesamt betrachtet. Eine weitere wichtige Anforderung ist ein autonomer Betrieb der Anlage. Hierfür werden im Rahmen des Projekts unterschiedliche Membranen untersucht, da diese maßgeblich die Selbstentladungsrate der Batterie im Betrieb bestimmen. Durch eine unsymmetrische Selbstentladung beider Halbzellen kommt es zu einer kontinuierlichen Kapazitätsminderung der Batterie, die sich durch die Abnahme der Entladetiefe beschreiben lässt. Mittels eigener Messungen an einem Prüfstand einer Zelle mit 100 cm<sup>2</sup> aktiver Fläche und online-Aufzeichnung von Prozessgrößen werden die Einflussfaktoren des sogenannten Vanadium-Crossovers, der für die Selbst-

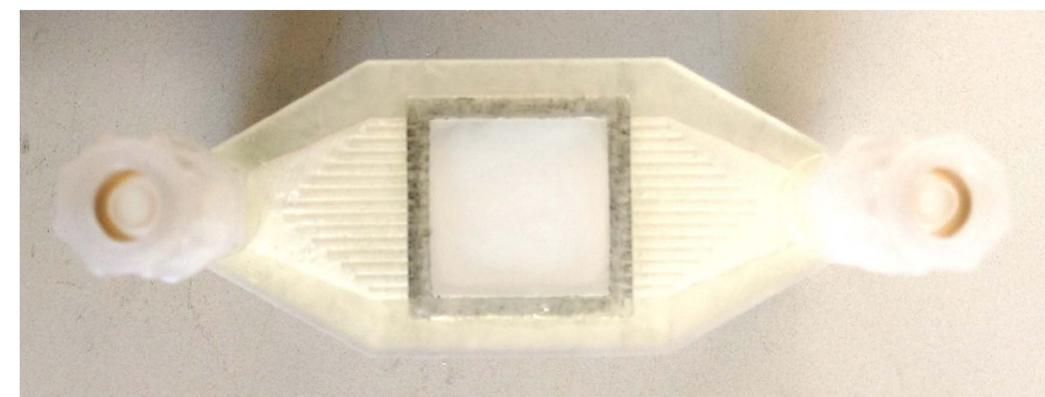


Abbildung 1: Poröse Glasmembran auf einem mittels Rapid Prototyping hergestellten Träger.

## Daten zum Projekt

### Einsatzmöglichkeiten von porösen Glasmembranen in Redox-Flow Batterien

**Finanzierung:** DFG  
**Partner:** Prof. Enke, Universität Leipzig  
**Bearbeiter:** Horst Mögelin  
**Projektleiter:** Prof. Ulrich Kunz  
**Laufzeit:** 4/2015 – 3/2018

### Scale-up von Redox-Flow Batterien

**Finanzierung:** Industrie  
**Partner:** Thyssen-Krupp Industrial Solutions  
**Bearbeiter:** Katharina Schafner  
**Projektleiter:** Prof. Thomas Turek  
**Laufzeit:** 1/2012 – 9/2018

### Neuartige großflächige Bipolarplatten im Extrusionsverfahren für Redox-Flow Batterien

**Finanzierung:** BMWi  
**Partner:** Centroplast, Eisenhuth, thyssenkrupp Industrial Solutions, ZBT  
**Bearbeiter:** Isabelle Kroner und Eva Prumbohm  
**Projektleiter:** Prof. Ulrich Kunz und Prof. Thomas Turek  
**Laufzeit:** 11/2015 – 10/2018

### Organische Redox-Flow Batterien

**Finanzierung:** TU Clausthal  
**Bearbeiter:** Stina Bauer  
**Projektleiter:** Prof. Kaufmann und Prof. Thomas Turek  
**Laufzeit:** 07/2016-06/2019



Thomas Turek



Ulrich Kunz

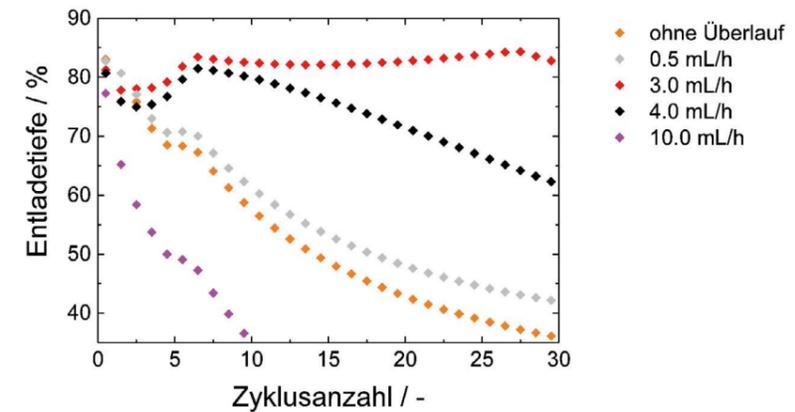


Abbildung 2: Berechneter Verlauf der Entladetiefe für verschiedene Überflussraten in Abhängigkeit von der Anzahl der Laden-/Entladezyklen.

entladung verantwortlich ist, mathematisch beschrieben. Aus diesen Berechnungen lassen sich unterschiedliche Prozessstrategien ableiten und bewerten. Eine kapazitätssteigernde Methode ist beispielsweise ein kontinuierlicher Überlauf von einem Elektrolyttank in den anderen. In Abbildung 2 ist der Verlauf der Entladetiefe für unterschiedliche Überlafraten für 30 Zyklen dargestellt.

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

Die Leistung von Redox-Flow Batterien hängt von der Größe der aktiven Fläche der elektrochemischen Zellen und damit direkt von der Größe der Bipolarplatte ab. Das Konsortium aus Industrie (Centroplast, Eisenhuth und thyssenkrupp Industrial Solutions) und Forschung (ICVT und ZBT) hat sich zum Ziel gesetzt, diese auf eine aktive Zellfläche von 2,7 m<sup>2</sup> zu vergrößern. Dies entspricht mehr als dem 30fachen der bisher

kommerziell verfügbaren Zellflächen. Dadurch können zukünftig auch großtechnische, industrielle Anwendungen realisiert werden. Das Gemeinschaftsprojekt zur Herstellung der Bipolarplatte wird von Eisenhuth koordiniert.

Am ICVT werden umfangreiche Materialcharakterisierungen und elektrochemische Untersuchungen der neuartig hergestellten Platten durchgeführt, um eine gleichbleibende Qualität hinsichtlich der Leitfähigkeit, Stabilität und Leistung zu gewährleisten. Die Stabilität der Bipolarplatten wird durch eine Untersuchung der Leitfähigkeit vor und nach der elektrochemischen Belastung geprüft (siehe Abbildung 3).

Beim Scale-up der aktiven Zellfläche erhöht sich auch der Druckverlust. Mit einem mathematischen Modell, welches die elektrochemischen und hydrodynamischen Eigenschaften der Redox-Flow Batterien abbildet, werden Strömungsfelder zur Begrenzung des Druckverlustes entwickelt.

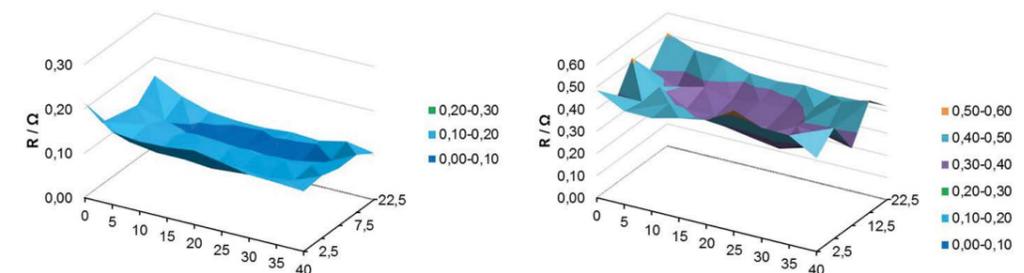


Abbildung 3: Widerstandmapping von Bipolarplatten zur Alterungsuntersuchung.

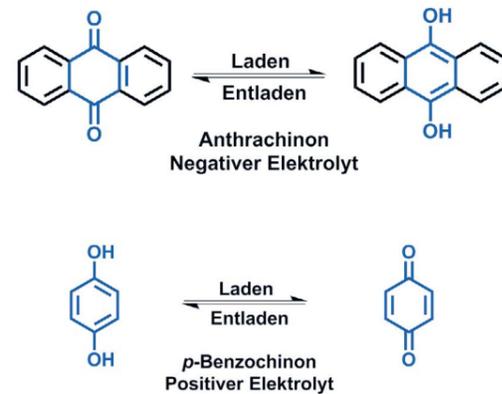


Abbildung 4: Ablaufende Reaktionen beim Lade- und Entladevorgang einer vollorganischen Redox-Flow Batterie. In blau dargestellt: chinoides System

### Organische Redox-Flow Batterien

Da der Vanadiumelektrolyt einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten der Redox-Flow-Batterie hat, wird intensiv nach neuen alternativen Elektrolyten gesucht. Hierbei liefert die Natur eine große Anzahl an Beispielen für einfache Redox-aktive Moleküle, deren Verwendung in einer Redox-Flow Batterie geprüft wird. Am ICVT werden dabei in Zusammenarbeit mit dem Institut für Organische Chemie bei Prof. Dieter Kaufmann kostengünstige Elektrolyte aus

nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Diese werden elektrochemisch charakterisiert sowie hinsichtlich ihrer Einsatz- und Leistungsfähigkeit getestet. Insbesondere die Chinone weisen vielversprechende elektrochemische Eigenschaften auf. Im wässrigen Medium finden reversible 2-Elektronen-Übertragungsreaktionen statt (siehe Abbildung 4). Gemäß ihres Redox-Potentials können die Benzochinone als positiver, die Anthrachinone als negativer Elektrolyt eingesetzt werden. Dies ermöglicht die Realisierung von vollorganischen Redox-Flow Batterien.



v.l.n.r. Horst Mögelin, Christine Minke, Isabelle Kroner, Ulrich Kunz, Stina Bauer, Thomas Turek, Eva Prumbohm, Katharina Schafner

## MoBat: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik

### Zielsetzung des Forschungsverbundes

Der Einsatz von Batteriesystemen für Industrieanwendungen, welcher ein hohes Maß an Leistungsfähigkeit und Energiedurchsatz voraussetzt, wird derzeit oftmals mit Hilfe hoher Batteriekapazitäten und Batteriewechselkonzepten realisiert. Dies führt dazu, dass batteriebetriebene Fahrzeuge im ökonomischen Vergleich gegenüber konventionell betriebenen Fahrzeugen noch nicht so konkurrenzfähig erscheinen, wie sie es sein könnten. Neuartige Hochleistungsbatterien mit Lithiumtechnik sind jedoch in der Lage, mit sehr hoher Leistung geladen zu werden, was neue Einsatzmöglichkeiten generiert. Im Projekt „MoBat“ wird daher ein modulares Hochleistungsbatteriesystem entwickelt, welches zu einer Skalierbarkeit für verschiedenste Anwendungen führen soll. Zudem soll aufgezeigt werden, dass durch Schnellladungen auf teure und aufwendige Batteriewechselkonzepte in Industrie- und ÖPNV-Anwendungen verzichtet werden kann, was einen ökonomischen Vorteil mit sich bringt. Voraussetzung für den praktischen Einsatz ist die Bereitstellung von Schnellladesystemen, das heißt Hochleistungsbatterien mit kompatibler Ladetechnik. Des Weiteren sind für Schnellladungen hohe Stromstärken erforderlich, so dass ein leistungsfähiges Kühlkonzept der Batterie unumgänglich ist. Die Herausforderungen liegen dabei erstens im Bereitstellen hoher elektrischer Leistungen mit einer neu entwickelten, angepassten Ladetechnik, zweitens in den mit Schnellladungen verbundenen extremen elektrischen und ther-



Abbildung 1: modulares Hochleistungsbatteriesystem [Quelle: AKASOL GmbH]

mischen Belastungen der Batterie sowie drittens in der damit einhergehenden Sicherheits- und Lebensdaueroptimierung.

Im Projekt soll vor allem das Zusammenwirken von vergleichsweise kleinen, aber besonders leistungsstarken Lithium-Batterien und effizienter Ladetechnik optimiert werden. Dadurch lassen sich die Vorteile für den Einsatz einer Schnellladestrategie in Hochleistungsanwendungen, zum Beispiel für Elektrobusse und andere Heavy-Duty-Anwendungen, herausarbeiten.

### Ziele des EFZN-Teilprojekts

Das Teilprojekt des EFZN hat zum Ziel, neuartige Schnellladealgorithmen für Hochleistungsbatterien zu identifizieren und sie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das prognostizierte Alterungsverhalten, und damit auf die Lebensdauer, von Batteriesystemen hin zu bewerten. Hierzu sind die ausgewählten Ladeverfahren in verschiedensten Tests auf Zell-, Modul- und Systemebene anzuwenden und zu bewerten. Die Frage, die sich hierbei stellt, ist, ob abweichend zum Standard IU-Ladeverfahren Methoden bestehen, mit welchen sich Lithium-Batterien sehr schnell aber dennoch scho-

### Projektpartner:

- AKASOL GmbH
- Schunk Bahn- und Industrietechnik GmbH
- Wolfsburg AG
- Fraunhofer HHI
- Stöbich technology

nend vollladen lassen. Durch die Wahl eines geeigneten Ladeverfahrens kann eine hohe Lebensdauer und/oder eine kurze Ladezeit realisiert werden. Im EFRE-Projekt „Schnellladung von Elektrofahrzeugen“ konnten seitens des EFZN bereits erste vielversprechende Ergebnisse erzielt werden. So gelang es, die Ladedauer eines Testfahrzeugs für eine Vollladung (DSOC=100 %) auf unter 30 Minuten zu verkürzen. Es zeigte sich ebenfalls, dass sich die getesteten Batterien und Zellen mit geeigneten Ladeverfahren nicht so stark erwärmten, wie bei einer vergleichbaren CC-CV-Ladung. Jedoch konnten bisher noch keine Aussagen zum Alterungseinfluss der Verfahren auf Batterien getroffen werden, da hierfür Langzeituntersuchungen nötig sind. Diese sollen im Projekt MoBat“ durchgeführt werden, wobei nunmehr verschiedenste Ladealgorithmen im Hinblick auf die Auswirkungen auf das thermische Verhalten, die Lebensdauer und den Einfluss einer Kühlung näher untersucht werden sollen. Schwerpunkt der Forschung stellt somit die Untersuchung des Degradationsverhaltens von Lithium-Batterien vor dem Hintergrund permanenter Schnellladungen dar. Ziel der Lebensdaueruntersuchungen ist zu prüfen, ob Schnellladungen generell eine beschleunigte Alterung von Lithium-Batterien nach sich ziehen, beziehungsweise ob dieser Alterungseinfluss ggf. durch geeignete Ladeverfahren gemindert oder gar aufgehoben werden kann. Hierfür werden die Daten von Langzeituntersuchungen einzelner Zellen, Batteriemodule und des

Gesamtsystems dienen, um das Alterungsverhalten abschließend für die unterschiedlichen Batterieebenen zu modellieren. Zwar bestehen verschiedenste Modellansätze zum Alterungsverhalten von Lithium-Batterien, diese beschränken sich jedoch hauptsächlich auf die Zellebene. Mitunter betrachten die bestehenden Veröffentlichungen zum Teil auch sehr detailliert die komplexen chemischen Abläufe innerhalb der einzelnen Zellen und lassen auf Zellebene sehr genaue Lebensdauerprognosen zu. Oftmals wird dabei auch dargelegt, dass die Prognosen auf Zellebene eins zu eins auf Systemebene hochgerechnet werden können. Die Erfahrungen des EFZN zeigen jedoch, dass sich in einem System von beispielsweise 300 Einzelzellen nicht alle exakt identisch verhalten und daher auch nicht über die gleiche Lebensdauer verfügen. In diesem Zusammenhang besteht die Frage, wie Batteriemanagementsysteme durch aktives oder passives Balancing die Alterung und somit die Lebensdauer beeinflussen. Anhand der Modellierung werden daher einerseits die durchgeführten Versuche genauestens nachbildet und interpretiert, andererseits verlässliche Aussagen über zukünftige Entwicklungen von Zellen, Modulen und Systemen in Bezug auf Alterung, Kapazitätsverhalten, Innenwiderstände u.v.m. getroffen. Dies hat zum Ziel, zukünftig für verschiedenste Fahrprofile Aussagen zur optimalen Speichergröße und Betriebsstrategie vor dem Hintergrund der zu erwartenden Alterung treffen zu können. Dieses hat direkte Auswirkungen auf die Wirtschaft-

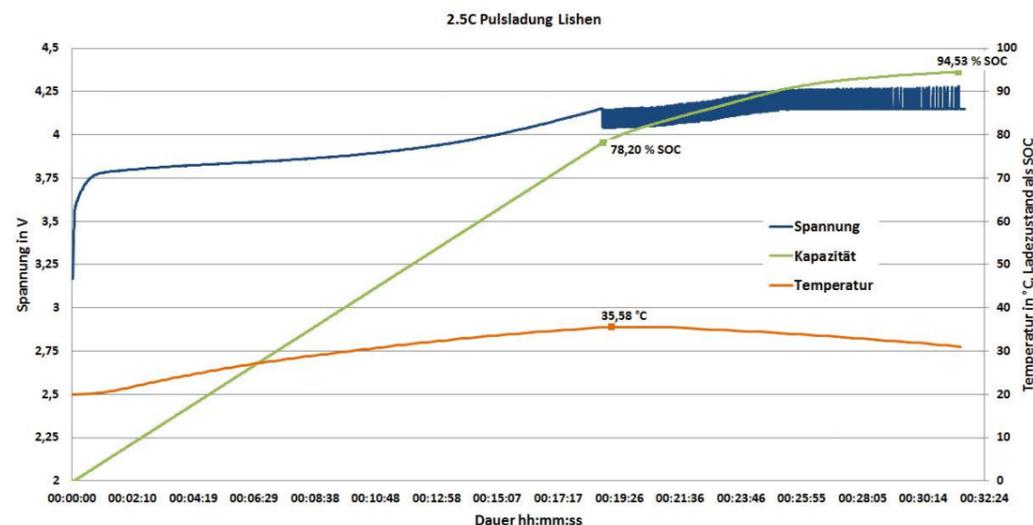


Abbildung 2: Pulsladung einer LISHEN NMC-Zelle

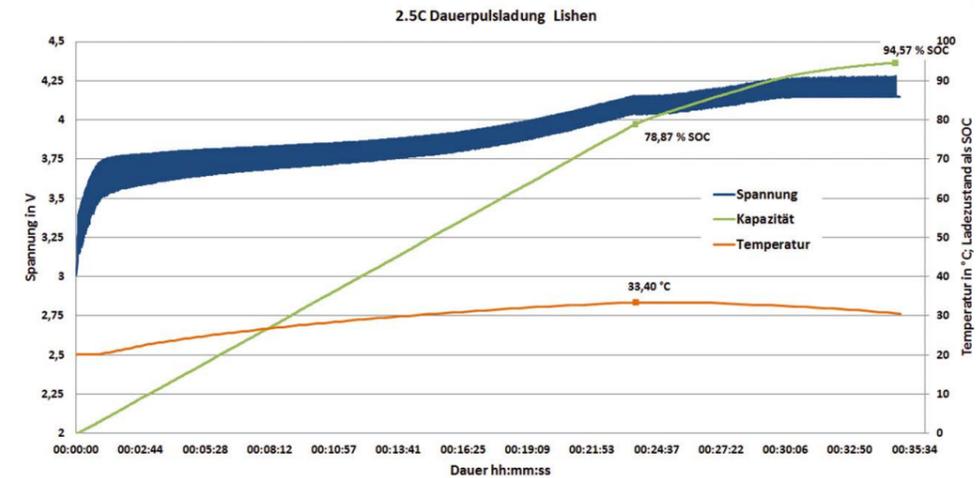


Abbildung 3: Dauerpulsladung einer LISHEN NMC-Zelle

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**  
MOBAT: Modulares  
Hochleistungsbatteriesystem

**Fördernde Stelle:**  
Bundesministerium für Wirtschaft  
und Energie

**Förderkennzeichen:**  
03ET6107A

**Projektlaufzeit:**  
01.11.2016 – 31.10.2019

**Berichtszeitraum:**  
01.11.2016 – 31.12.2017

**Bearbeiter:**  
Marcel Thiele, M. Eng.

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



Hans-Peter Beck



Marcel Thiele

lichkeit des Gesamtsystems und den Betriebskosten solcher Batteriesysteme einschließlich der notwendigen Ladetechnik (TCO).

## Projektstand

In aktuellen sowie Voruntersuchungen wurden verschiedenste Ladeverfahren (zum Beispiel Stufenladung, Laden ohne Strombegrenzung, Pulsladung, IR-freies Laden) getestet, welche die Konstanzspannungsphase ersetzen oder verkürzen und somit zu einer weiteren Reduktion der Ladedauern führen können. Die Ergebnisse der Untersuchungen führten zu zwei Ladeverfahren, die im Hinblick auf Ladedauer, Temperaturniveau und Spannungslage die besten Ergebnisse aufwiesen.

Beim sogenannten Pulsverfahren erfolgt zunächst ebenfalls eine Konstantstromladung, die Konstanzspannungsphase wird jedoch durch ein Pulsmuster ersetzt. Dabei wird mit Strompulsen fester Amplitude und Breite geladen, lediglich die Pausen zwischen den Pulsen variieren spannungsabhängig. Mit diesem Verfahren konnte bereits mit einer Laderate von 2,5C (zweieinhalbfacher Nennstrom, 92,5 A) eine Ladedauer von 31 Minuten erreicht werden, wofür mit dem Standardladeverfahren der fünffache Nennstrom (im Vergleich die doppelte Leistung) benötigt wurde. Dies spiegelte sich ebenfalls im Temperaturverhalten wieder, sodass beim Pulsverfahren mit 2,5C eine um 10 K geringere Oberflächentemperatur im Vergleich zum Standardverfahren mit 5C erreicht werden konnte. Die Ladedauer war in beiden Fällen annähernd identisch. In Abbildung 2 ist das Pulsverfahren veranschaulicht.

Als weiteres alternatives Ladeverfahren soll die sogenannte Dauerpulsladung weiter verfolgt werden. Bei diesem Verfahren wird während der gesamten Ladedauer mit Strompulsen geladen. Einerseits soll dies zu verringerten Überspannungen durch Ladungsträgerdurchtritt und Doppelschicht führen und somit die Verlustleistung sowie die daraus resultierende Erwärmung der Zelle reduzieren. Andererseits ermöglichen die kurzen Ladepausen zwischen den Strompulsen eine bessere Interkalation der Lithium-Ionen in das Aktivmaterial, was das sogenannte Lithium-Plating (metallisches Abscheiden von Lithium an

der Elektrodenoberfläche) verringern könnte. Dies ist vor allem bei hohen Ladeströmen von Bedeutung. Auf Grund der Pausen zwischen den Strompulsen ist dieses Verfahren zwar etwas langsamer (Ladedauer bei 2,5C rund 34 Minuten) als das Puls-ladeverfahren, aber wesentlich schneller als das Standardverfahren. Zudem zeigte sich im Vergleich zum Puls-ladeverfahren ein um 2 K geringerer Temperaturanstieg, so dass bei diesem Ladeverfahren ggf. mit noch höheren Stromraten geladen werden kann, was weiter verfolgt werden soll. Die Dauerpuls-ladung ist in Abbildung 3 veranschaulicht.

## ReserveBatt: Systemdienstleistungen für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems – Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien

### Ansatz

Die Energiewende stellt die Versorgungssicherheit im Stromversorgungsnetz vor neue Herausforderungen und fordert innovative Lösungsansätze. Wie bei zunehmender Nutzung erneuerbarer Energien und der damit verbundenen Ablösung konventioneller Großkraftwerke die Netzstabilität erhalten werden kann, soll in dem Projekt „ReserveBatt“ untersucht werden. Hierzu soll ein leistungsstarkes und intelligentes Batteriesystem zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen fluktuierender Energieerzeugung und -verbrauch gewährleisten.

### Ziel

Die Ziele des Gesamtprojekts sind die Konzeption und der Aufbau eines Demonstrators zur Erbringung von Momentanreserve als Systemdienstleistung für Betreiber von Energieversorgungsnetzen sowie die Erforschung seines Verhaltens in der Praxis und dessen Bewertung in Bezug auf den vorgesehenen späteren Einsatzbereich. Abgerundet wird das Projekt durch den Entwurf und die Evaluierung von Verwertungsmöglichkeiten und möglichen Geschäftsmodellen für die Erbringung von

### Projektpartner:

- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)
- AKASOL GmbH
- Infineon Technologies AG
- Stöbich technology GmbH
- Wolfsburg AG
- LTI ReEnergy GmbH
- Tennet GmbH, HarzEnergie Netz GmbH (assoziiert)

Systemdienstleistungen. Der Demonstrator enthält als Kernkomponente einen sogenannten Stack-Wechselrichter, der im Rahmen des Projekts konzipiert und aufgebaut werden soll. Der Stack-Wechselrichter koppelt eine Lithium-Ionen-Hochleistungsbatterie mit dem Versorgungsnetz und steuert den Energiefluss zwischen beiden Systemen. Der Demonstrator soll im Leistungsbereich von 400 kW mit einem Batteriespeicher bei einem Energieinhalt von etwa 50 kWh ausgelegt werden. Der Feldtestbetrieb soll sich über mehrere Monate erstrecken, um eine aussagekräftige praxisnahe Erforschung und Bewertung seines Verhaltens unter besonderer Beachtung des Sicherheitsaspektes sicherzustellen.

### Methodik

Für die Konzeption, den Aufbau und die anschließende Untersuchung der Komponenten sowie des Gesamtsystems zur Erbringung der Momentanreserve aus einem Hochleistungs-Batteriespeicher werden folgende Schritte am EFZ durchgeführt:

- Optimierte Auslegung eines Batteriespeichers hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Energieinhalt unter Beachtung und Konzeption von Sensorik, Kühlung und Sicherheitsmaßnahmen sowie der Lebensdauer der Batterie
- Konzeption und Koordination des Aufbaus eines Leistungsspeichers bestehend aus Lithium-Batterie und Leistungselektronik zur Erbringung von Momentanreserve und anderen Systemdienstleistungen (ohne Primär- und Sekundärregelung sowie Minutenreserve) auf Niederspannungsebene als Labormuster und integrierte Gesamtlösung
- Berücksichtigung des Einflusses der Belastungen aus den Systemdienstleistungen (SDL) auf die Batterie insbesondere der Auswirkungen von dynamischen Belastungen und sog. Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die

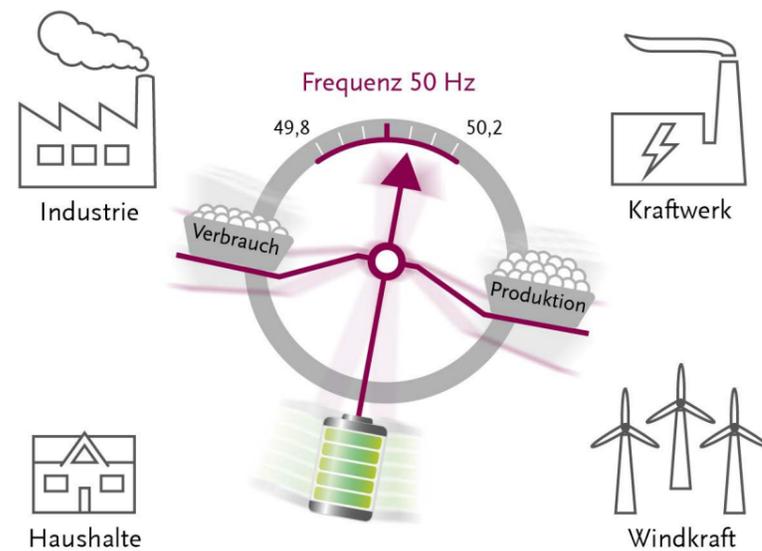


Abbildung 1: Darstellung des Gleichgewichts im elektrischen Energieversorgungssystem zwischen fluktuierender Erzeugung und Verbrauch

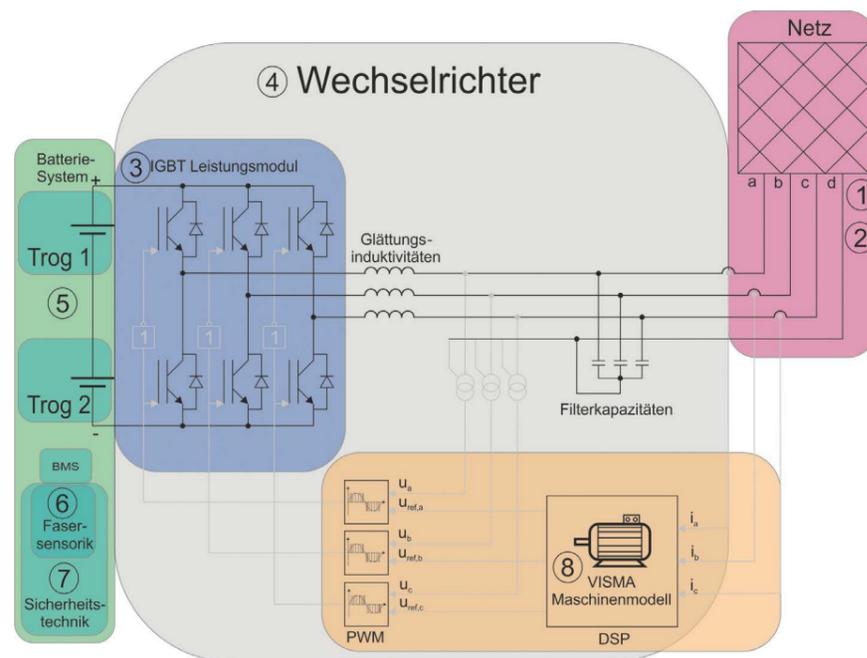


Abbildung 2: Darstellung der Arbeitsbereiche der Projektpartner im Gesamtsystem

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

ReserveBatt: Systemdienstleistungen für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems: Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03ET6123A

### Projektlaufzeit:

01.06.2017 bis 31.05.2020

### Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Projektkoordination:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

### Projektbearbeitung:

Lennart Beushausen, M.Sc.  
Frank Deblon, M.Sc.  
Julian Gollenstede, M.Sc.

Alterung des Speichers, Rückwirkungen auf das Gesamtsystemverhalten einschließlich der netzstabilisierenden Wirkung

- Bewertung der Wirkung der SDL aus der Batterie über die Leistungselektronik auf das Netz und Entwicklung einer „Präqualifizierungsvorschrift“ zur Erbringung von Momentanreserve
- Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Kosten/Nutzen-Vergleich auch zu anderen Speichertechnologien oder alternativen Flexibilitätsoptionen zum Erbringen von SDL
- Entwicklung eines Business-Case in Abhängigkeit des aktuellen Marktgeschehens

## Projektstand

Zum momentanen frühen Projektstand befinden sich die Partner in der Konzeptionsphase mit der Erstellung eines technischen Lastenheftes für die Komponenten und das Gesamtsystem. Insbesondere die Spezifikationen und Anforderungen an das Gesamtsystem sind frühzeitig für alle Projektpartner festzulegen, da auf Grund der großen Verzahnung und Abhängigkeiten der Teilprojekte untereinander Fehlentwicklungen zu vermeiden sind. Darüber hinaus verfolgen die Projektpartner parallele ihre individuellen Forschungsziele, die für die Erreichung des Gesamtprojekterfolges notwendig werden.

Folgende Komponenten und Arbeitspakete sind Teil des Gesamtsystems beziehungsweise des Projektes:

Auf der Netzseite sind die Netzanschlussbedingungen und mögliche Präqualifizierungsvorschriften (AP1) für die Erbringung von Momentanreserveleistung genauer zu definieren. Hierzu spielt auch das Netzmonitoring (AP2) eine große Rolle. Das IGBT-Leistungsmodul – ILM (AP3) wird mit einer speziellen Steuerelektronik (AP4) in das Gesamtsystem des Wechsellrichters überführt (AP5). Für das speziell zu entwickelnde Hochleistungs-Batteriesystem (AP6) werden zur Analytik faseroptische Sensoren (AP7) und neueste Sicherheitstechnik (AP8) verwendet. Die spezielle Steuerung (AP9) wird simulatorisch für Batterie (AP10), Wechsellrichter (AP9) und Gesamtsystem (AP11) nachgebildet. Außerdem wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP12) zur Bewertung des Gesamtsystems stattfinden.



Hans-Peter Beck



Ralf Bengler



Abbildung 3: Die Teilnehmer der „ReserveBatt“-Auftaktveranstaltung am 28. Juni 2017.

## Green Offshore – Nachnutzung der vorhandenen Öl- und Gas- Offshore-Infrastrukturen in der Nordsee

Die vorliegende Studie untersucht die Nachnutzung ausgedienter Offshore-Bohrplattformen und deren Infrastrukturen in der Nordsee durch die Installation von Power-to-Gas Anlagen auf diesen Plattformen und deren Betrieb über Offshore-Windenergie.

Mit über 600 Offshore-Bohrplattformen und 10.000 km an Rohrleitungen gilt die Nordsee als eine der größten Offshore Produktionsstätte der Öl- und Gasindustrie. Die Branche sieht sich in dieser Region derzeit mit Stilllegungsprozessen konfrontiert und sucht nach Möglichkeiten, die mehrere Milliarden Euro schweren Kosten dieser Phase der Förderung zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Gleichzeitig erfährt die Offshore-Windindustrie einen enormen Zuwachs in dieser Region, welche in das Stromnetz integriert werden müssen und dieses vor neuen Herausforderungen stellt. Das vorgestellte Nachnutzungskonzept könnte einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten bei gleichzeitiger

Verlagerung der Kosten des Stilllegungsprozesses nach hinten und einer längeren Ausnutzung der Plattformen. Power-to-Gas Anlagen wurden bisher in zahlreichen Demonstrationsanlagen erforscht und zeigen hohes Weiterentwicklungspotential. Die Produktion und Versorgung verschiedener Sektoren mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff („grüner“ Wasserstoff) können CO<sub>2</sub>-Emissionen nachhaltig reduzieren, welche andernfalls mit der konventionellen Produktion von Wasserstoff emittiert werden würden.

In der Arbeit werden drei Szenarien hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und ökonomischen Wirtschaftlichkeit simuliert und analysiert. Das erste Szenario beschreibt den Betrieb einer kleinen Power-to-Gas-Anlage mit Windenergie, welche andernfalls aufgrund von Netzüberlastungen abgeregelt werden müsste. Die Elektrolyseure des zweiten und dritten Szenarios werden von der Energie ganzer Windparks betrieben. Um die Menge des



erzeugten Wasserstoffs abzuschätzen und die Betriebsweise des Elektrolyseurs zu ermitteln, wurde das Fahrverhalten eines Offshore-Windparks anhand von Windgeschwindigkeiten über 10 Jahre simuliert. Alle Szenarien nutzen, aufgrund des geringeren Platzverbrauchs gegenüber der alkalischen Elektrolyse, Proton-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyseure, da Platz einer der limitierenden Faktoren auf Offshore-Plattformen ist. Das zweite Szenario konzentriert sich auf die Produktion von „grünem“ Wasserstoff für den Mobilitätsmarkt, da hier die höchsten Absatzpreise erzielt werden können. Das Dritte befasst sich mit dem Ausgleich von Schwankungen im Onshore-Stromnetz durch die Rückverstromung des Wasserstoffs und der Bereitstellung positiver Regelenergie. Die technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Szenarien ist abhängig von aktuellen Entwicklungen im Offshore-Windbereich, Weiterentwicklungen der Elektrolisetechnologie und Marktentwicklungen (zum Beispiel Ausschreibungsverfahren von Offshore-Windenergie, CO<sub>2</sub>-Emissionshandel, Zertifizierung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff). Die vorliegende Arbeit konzipiert eine der ersten Nachnutzungsmöglichkeiten für Offshore-Bohrplattformen im erneuerbaren Energiebereich und bietet eine Grundlage für weitere Studien und Demonstrationsvorhaben.



## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Nachnutzung der vorhandenen offshore Infrastrukturen in der Nordsee durch Speichertechnologien für erneuerbare Energien

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03ET6108

### Projektlaufzeit:

01.07.2016 – 31.05.2017

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Projektkoordinator:

Dr. Knut Kappenberg,  
knut.kappenberg@efzn.de;  
Ronia Simons, M.Sc.,  
ronia.simons@tu-clausthal.de



Hans-Peter Beck



Knut Kappenberg

# Huntorf2020 – Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicher-kraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

## Projekthintergrund

Im Jahre 1978 wurde das Druckluftspeicher-kraftwerk Huntorf in Betrieb genommen, um das Norddeutsche Stromnetz abzusichern. Das Kraftwerk verfügt über eine elektrische Leistung von 310MW, die über insgesamt drei Stunden abgerufen werden kann. Der Turbinenwirkungsgrad von bis zu 65 Prozent übertrifft dabei den von modernen -und- Dampf-Kraftwerken (GuD). Die für die Aufheizung der Druckluft erforderliche thermische Leistung wird dabei durch Erdgas zur Verfügung gestellt. Trotz der positiven Eigenschaften des Druckluftspeicher-kraftwerks ist die Betriebsstundenzahl in den letzten Jahren aus wirtschaftlichen Gründen drastisch auf unter hundert gefallen. Da im Zuge der Energiewende der Strom zukünftig vorwiegend regenerativ erzeugt werden soll, wird die Stromeinspeisung stark volatil. Um weiterhin einen sicheren und stabilen Netzbetrieb sicherzustellen, werden neben flexibel regelbaren Kraftwerken ebenso Strom-

speicher essentiell. Das Speicherkraftwerk Huntorf soll im Zuge des Projekts in die Lage versetzt werden, einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Ziele der Energiewende durch Bereitstellung flexibler Speicher- und Entlade-Betriebspunkte leisten können. Der erfolgreiche (Test-)Betrieb einer solchen Anlage hat Leuchtturm-Charakter mit internationaler Strahlkraft. Ebenso soll ein Anreiz zur Erweiterung der Druckluftspeicherflotte als Flexibilitätsoption im Kontext von erneuerbarer Energieerzeugung in Deutschland und der Welt geschaffen werden.

Das Projekt Huntorf2020 ist am Forschungsschwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme am Energieforschungszentrum der TU Clausthal eingegliedert. In diesem Forschungsschwerpunkt steht die regenerative Erzeugung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff mit chemischer Konversion und Speicherung sowie dessen Rückverstromung im Fokus. Innerhalb des Projekts werden in der beantragten Projektlaufzeit zunächst mögliche Konzepte zur direkten (Mit-)Verbrennung von Wasserstoff in der vorhandenen Hochdruck- und Niederdruck-brennkammer untersucht. Die tatsächliche Erzeugung und Speicherung steht in dieser Projektphase noch nicht im Vordergrund, kann jedoch entsprechend den Projektergebnissen in anschließenden Folgeprojekten detailliert untersucht werden. Denkbar ist hierbei beispielsweise die anschließende Zusammenarbeit mit dem dann im Forschungsschwerpunkt Nachhaltige Energiesysteme etablierten Power-to-X-Forschungslabors.

## Grundkonzept

Im Projekt Huntorf2020 sollen Wege zur Neu-Konzeptionierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicher-kraftwerk Huntorf entwickelt und analysiert werden. Zu diesem Zweck soll in der ersten Phase ein umfassendes Anlagenmodell erstellt werden, mit dem die Eigenschaften ver-

## Projektpartner

- Energie-Forschungszentrum, vertreten durch das Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik und das Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme
- uniper SE

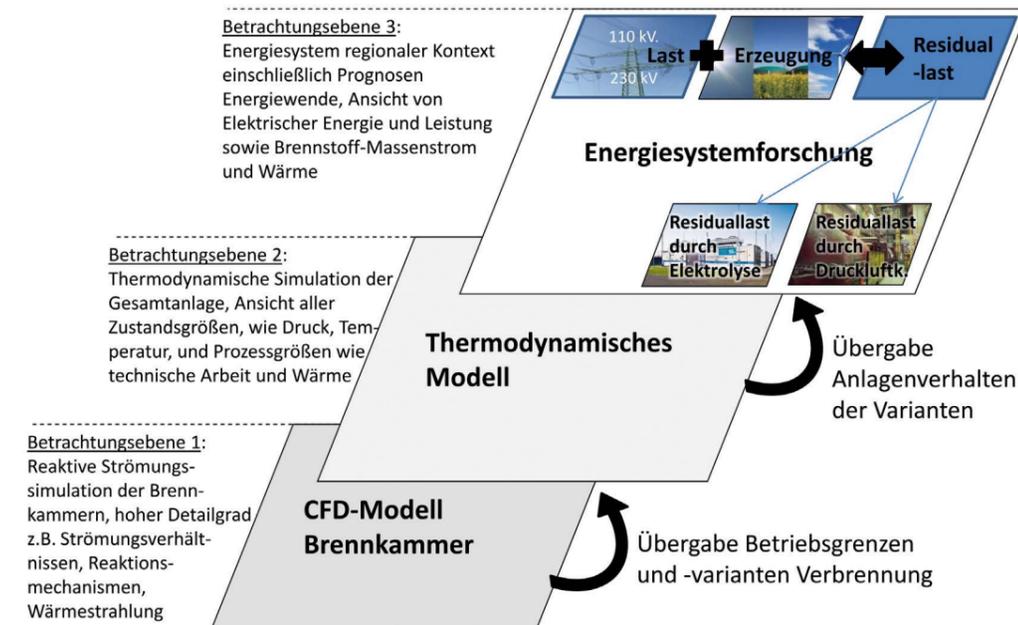


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Simulationsebenen

schiedener Betriebssituationen und Konzeptvarianten analysiert werden können. Die Modellierung umfasst hierbei drei Simulationsebenen verschiedener Tiefe, die jeweils untereinander verknüpft sind, siehe Abbildung 1. Die Basis bildet hierbei eine CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics), das detaillierte Einblicke in thermo-chemischen Prozesse innerhalb der beiden Hochdruckbrennkammern ermöglicht. Von besonderem Interesse ist hierbei die modelltechnische Untersuchung der Möglichkeiten zur Substitution von Erdgas durch (regenerativ erzeugten) Wasserstoff. Die Auswirkungen auf den Gesamtprozess der auf diese Weise ermittelten möglichen Betriebszustände werden im überlagerten thermodynamischen Gesamtmodell untersucht. Eine möglichst gute Validierung dieser beiden Modelle ist hierbei von essentieller Bedeutung. Die weiterführende makroskopische Betrachtung im energetischen Gesamtkontext mit einer hohen Anwendungsnähe erfolgt letztendlich in der dritten Ebene, der Energiesystemforschung. Hierbei wird das Energiesystem inklusive verschiedener (möglicher) Wasserstoffherzeugungseinheiten unter Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen (Energieszenarien am Standort) hin zu höherem Anteil an Erzeugern erneuerbarer Energie, wie Windkraft und Photovoltaik, berücksichtigt. Besonderes Augenmerk gilt dabei der Entwicklung von netzdienlichen Betriebsstrategien für

kombinierte Energieerzeugungs- und -speicheranlagen.

Auf Basis dieser drei Modellebenen (CFD-Modell der Brennkammern, thermodynamisches Gesamtmodell und Energiesystem-Modell) werden in der zweiten Phase verschiedene Konzeptvarianten im Detail analysiert, um Aussagen zur sowohl technischen als auch ökonomischen Performance zu treffen. Eine wesentliche Fragestellung dabei ist, in welchem Maß eine Zufeuerung von regenerativem Wasserstoff mittels geringer anlagentechnischer Änderung der Bestandsanlage Huntorf möglich ist. Ebenso wird die Möglichkeit zum (teil-)adiabaten Betrieb, bei dem die bei der Kompression anfallende Wärme durch geeignete Speichersysteme zur Brennstoffeinsparung bei der Entspannung genutzt werden soll, untersucht.

Die im Projekt erarbeiteten Konzepte können in möglichen Folgeprojekten (Phase III) kommerziell umgesetzt oder weiter untersucht werden. Mögliche Folgeprojekte sind hierbei beispielsweise die Entwicklung eines Wärmespeichermoduls, die Errichtung eines Prüfstands zur detaillierten Untersuchung des Verbrennungsverhaltens von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen unter hohem Druck oder die Überprüfung des Wasserstoffspeichervermögens der vorhandenen Druckluftspeicherkavernen.

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

Huntorf2020 – Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03ET6139A

### Projektlaufzeit:

01.01.2018 bis 31.12.2019

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Roman Weber

### Projektkoordinator:

Dipl.-Math. Marc Muster,  
Dipl.-Ing. Frederike Kaiser

## Bisherige Forschungsaktivität

Das IEVB hat in Zusammenarbeit mit dem Betreiber uniper im Rahmen eines Promotionsvorhabens bereits erfolgreich zusammengearbeitet. In diesem Promotionsvorhaben wurden typische Betriebseigenschaften einzelner Komponenten des Druckluftspeicherwerk ermittelt, um auf Basis thermodynamischer Berechnungen Aussagen über verschiedene Anlagenvarianten zu ermöglichen. Während qualitative Darstellungen dieser Art bereits in der Literatur zu finden sind, stellt die Detailtiefe der Bilanzierung und die Validierung mit Hilfe von zur Verfügung gestellten realen Prozessdaten ein Novum dar.



Roman Weber



Marc Muster

## AKZEPTANZ

### Befunde eines interdisziplinären Projektes zur Erforschung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Energiewende

#### Kurzfassung

Die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende ist eine wesentliche Voraussetzung für deren Umsetzung. Im Rahmen des Projektes Akzeptanz wurde untersucht, ob die aktuell durch die Energiewende induzierten Verteilungseffekte auf gesellschaftlichen Rückhalt stoßen. Konkret wurden folgende Ziele erreicht:

- Es wurde eine repräsentative Befragung zur Bestimmung der Kostenwirkung der Energiewende auf private Haushalte durchgeführt.
- Ökonomische Experimente zur Bestimmung individueller Verteilungs- und Klimaschutzpräferenzen wurden erfolgreich unternommen.
- Befragungs- und Experimentaldaten wurden gemacht, um zu belastbaren Aussagen über die gesellschaftliche Bewertung der Verteilungswirkung der Energiewende zu gelangen.

In intradisziplinären Diskussionen wurden Politikempfehlungen zur Erhöhung der gesellschaftlichen Akzeptanz der Energiewende erarbeitet.

#### Abstract

As with any public project, the public acceptance of the German energy transition is a cru-

#### Projektpartner:

- Universität Bremen
- Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
- Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg

cial precondition for its success. The research project "Akzeptanz" analyzed whether the distributional effects of the energy transition correspond to public opinions of justice as one parameter of public acceptance. Specifically, the following research goals were achieved:

- A representative survey of German households was conducted to determine the costs induced by the energy turnover.
- Economic experiments were used to determine individual preferences for cost distribution and climate protection.
- Data from the representative survey and economic experiments was matched to allow for robust assessments of the public assessment of the distributional effects of the energy turnover.

Recommendations for policies that increase the public acceptance of the energy turnover were developed in a transdisciplinary field.

#### Energiewende: Zielkonflikte zwischen Klimaschutz und Gerechtigkeit

Der mit der Energiewende verbundene Umbau des deutschen Energieversorgungssystems verspricht nicht nur vielfältige Nutzen, sondern verursacht auch Kosten, die innerhalb der Gesellschaft zu verteilen sind. Die gesellschaftliche Zustimmung zu den politischen Zielen der Energiewende wird nicht unwesentlich davon beeinflusst, ob und inwiefern die finanziellen Verteilungswirkungen mit den individuellen Gerechtigkeitsvorstellungen übereinstimmen.

Die empirische Untersuchung dieses Zusammenhangs zwischen Klimaschutz- und Verteilungspräferenzen privater Haushalte ist der Kern des Forschungsvorhabens. Im philosophischen Arbeitspaket (AP GERECHTIGKEIT) wurden hierzu Gerechtigkeitspostulate theoretisch entwickelt. Daraus abgeleitete Hypothesen wurden in das Design der Befragung von 11.000 Haushalten im Rahmen einer repräsentativen forsa-Panelerhebung (AP KOSTEN) und ökonomischer Entscheidungsexperimente

## Daten zum Projekt

#### Vorhabensbezeichnung:

Die Gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende: Koordination und Teilprojekt A: Verhaltenswissenschaftliche (energieökonomische) Aspekte

#### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

#### Förderkennzeichen:

01UN1201A

#### Projektlaufzeit:

01.06.2013 – 30.11.2016

#### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr. Roland Menges



Roland Menges

(AP VERHALTEN) eingespeist, die als „Quasi-Feldexperimente“ mit 1.000 Versuchspersonen in mobilen Experimentallaboren durchgeführt wurden.

Da der Umbau des Energiesystems das Entscheidungsverhalten der privaten Haushalte insbesondere auf den beiden Feldern „Ökostromförderung“ und „Energieeffizienz“ berührt, wurden die Präferenzen der Haushalte auf diesen beiden Gebieten untersucht. Die empirischen Ergebnisse der Teilprojekte wurden unter Einbindung eines Praxisbeirates aggregiert, um energiepolitische Schlussfolgerungen abzuleiten.

#### Ergebnisse und Schlussfolgerungen

##### I. Gerechtigkeitslücke: Regressivität des Finanzierungssystems wird abgelehnt

Die regressiven Effekte der aktuellen Finanzierungsmechanismen der Energiewende (v.a. EEG-Umlage) widersprechen den Gerechtigkeitsvorstellungen der Haushalte. Bevorzugt wird hingegen ein System, in dem alle Haushalte entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit einen Beitrag zur Energiewende leisten. Zwischen der tatsächlichen und der gewünschten Kostenverteilung der Haushalte lässt sich eine quantitativ bedeutsame Gerechtigkeitslücke identifizieren, die im unteren Einkommensdrittel auf eine 50 prozentige Überbelastung der Haushalte (circa 40 Euro pro Jahr) verweist. Politische Mechanismen zur Eindämmung der als ungerecht empfundenen Verteilungswirkungen sollten den Fokus auf die Sicherung eines Mindestbedarfs bei einkommensschwachen Haushalten legen.

##### II. Verteilungspräferenzen reagieren auf Kostenunsicherheit

Kostenunsicherheit führt tendenziell zu einer Verdrängung sozialer Präferenzen, die sich am Prinzip der Leistungsfähigkeit orientieren. Angesichts der derzeitigen Unsicherheit über die Kostenentwicklung und des parallelen Trends, dass die Zahlungsbereitschaft der privaten Haushalte für die Energiewende zwar nach wie vor hoch, derzeit aber signifikant rückläufig ist, gewinnt dieser Befund an zusätzlicher Bedeutung. Die Berechnung der erwarteten Kosten der Energiewende sollte daher möglichst transparent dargestellt werden.



Mobiles Experimentallabor, Schlossarkaden Braunschweig, März 2015

### III. Energieeffizienzförderung nur bedingt als sozialpolitische Kompensation für steigende Energiepreise geeignet

Häufig wird eine Förderung der Energieeffizienz als Antwort auf die Verteilungseffekte steigender Energiepreise betrachtet. Anders als bei den gesellschaftlichen Entscheidungen über den Umbau der Stromerzeugung und der damit verbundenen Kostenverteilung hängt das Energieeffizienzverhalten der Haushalte aber von vielen, aus Sicht der Politik wenig beeinflussbaren Parametern ab. Investitionsentscheidun-

gen sind hier durch subjektive Kosten/Nutzen-Kalküle, aber auch durch ökologische Motive und durch Reziprozität gekennzeichnet. Dies lässt zwar Raum für eine positive Rolle öffentlicher Demonstrationsprojekte oder für anreizsteigernde Energiesteuern. Tiefere Eingriffe wie etwa die Subventionierung von Effizienzinvestitionen führen bei den geförderten Haushalten zwar zu positiven Einkommenseffekten, können jedoch kontraproduktiven Mitnahme- und Verdrängungseffekten Vorschub leisten und damit den potenziellen Zielkonflikt zwischen Klima- und Sozialpolitik verschärfen.

## Batteriespeicheranlagen im Multi-Purpose-Betrieb: Energiewirtschaftsrechtliche Rahmenbedingungen

### Kurzfassung

Im Projekt „Batteriespeicheranlagen im Multi-Purpose-Betrieb: Energiewirtschaftsrechtliche Rahmenbedingungen“ wurde die Zusammenschaltung dezentraler Batteriespeicher in einer Energy Storage Cloud im Hinblick auf die energiewirtschaftsrechtlichen Vorgaben untersucht. Durch das im Projekt betrachtete Geschäftsmodell können ansonsten nur phasenweise nutzbare Batteriespeicher besser ausgelastet und einem größeren Nutzerkreis zur Verfügung gestellt werden. Untersuchungsschwerpunkt war zum einen die finanzielle Belastungssituation bei dem Bezug von Strom zum Zweck der Speicherung, von der die Wirtschaftlichkeit des Geschäftsmodells wesentlich abhängt. Ein weiterer Schwerpunkt waren die entflechtungsrechtlichen Grenzen für die Ausgestaltung des Modells. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Belastungssituation bei der Bewirtschaftung von Speichern über eine Energy Storage Cloud vorteilhaft ausfallen kann, sofern bestimmte systemische Grundsätze berücksichtigt werden.

### Abstract

In the project “Battery Storage Systems in Multi-Purpose Operation: Energy-Economic Framework Conditions”, the pooling of decentralized battery storage units in an energy storage cloud was analysed with regard to the provisions of energy law. While batteries can normally only be used during certain periods by their operator, according to the business model developed in this project batteries can be occupied for longer periods and can be made available to more users. One main focus of the investigation were the financial burdens related to the supply of electricity for the purpose of storage, which have a major influence on the economic viability of this business model. Another focus was the compliance of this business model with the unbundling regime. As a result, the study could show that the financial outcome for battery storage in an energy storage cloud can be positive, provided

that certain systemic principles are taken into account.

### Projektbeschreibung

Das Projekt „Batteriespeicheranlagen im Multi-Purpose-Betrieb: Energiewirtschaftsrechtliche Rahmenbedingungen“ wurde als Unterauftrag im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Rahmenprojekts „green2store“ im Zeitraum von August 2015 bis April 2016 durchgeführt. Es handelt sich um ein Folgeprojekt des Vorhabens „Abrechnung von dezentralen Speichern im Multi-Purpose-Betrieb“, welches von August bis Dezember 2014 ebenfalls als Unterauftrag im Projekt „green2store“ erstellt wurde. Das Projekt wurde von Prof. Dr. Hartmut Weyer, Direktor des Instituts für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (IBER) der TU Clausthal, geleitet und von Dr. Franziska Lietz bearbeitet.

Gegenstand des Rahmenprojektes green2store ist die Entwicklung eines neuen Vermarktungskonzeptes für Stromspeicher, die von ihren Betreibern zunächst für jeweils eigene Einsatzzwecke eingesetzt werden. Das entwickelte Modell basiert auf der Zusammenfassung dieser Stromspeicher in einer sog. Speichercloud, deren Kapazität nach Freigabe durch die sog. Primärnutzer der Speicher von einem Dienstleister, dem sog. Cloudbetreiber, an interessierte Dritte (sog. Sekundärnutzer) vermarktet werden soll. Dieses Konzept, nach dem die Speicher von den Primärnutzern in Zeiten der Nichtnutzung Dritten zur Verfügung gestellt werden, lehnt sich an das Modell des privaten Carsharings an. Den Primärnutzern eröffnen sich damit zusätzliche Einnahmemöglichkeiten. Für den Sekundärnutzer besteht der Vorteil, dass eine Investition in eigene Speicherkapazität nicht erforderlich ist und nur die tatsächliche Nutzung zu bezahlen ist. Neu ist in diesem Zusammenhang vor allem die Marktrolle des Cloudbetreibers, der die Speichermarktvermarktung für die Sekundärnutzung übernimmt. Indem dieser eine Bündelung vieler einzelner Speicher



zu einem virtuellen Großspeicher ermöglicht, sollen Marktzugangsbarrieren überwunden werden, die bislang u.a. aufgrund zu geringer Speicherkapazitäten und -leistungen einer erfolgreichen Vermarktung von Speicherkapazität an Dritte entgegenstanden. Das Projekt warf zudem die Frage auf, ob und inwieweit der (Verteiler-)Netzbetreiber als Betreiber oder als Nutzer der Speicher in der Energy-Storage-Cloud in Betracht kommen könnte.

Bei der juristischen Untersuchung wurden die rechtlichen Rahmenbedingungen analysiert. Hierbei wurde geprüft, ob und inwieweit das Modell grundsätzlich im geltenden Rechtsrahmen umsetzbar ist, und welche Auswirkungen sich aus den rechtlichen Vorgaben für die Wirtschaftlichkeit des Cloudmodells ergeben.

Einen Schwerpunkt bildete daher zunächst die Untersuchung der Belastungen bei der Einspeicherung des Stroms in die Cloud-Speicher. Hierbei wurde die Zahlungspflicht bezüglich der Netzentgelte, der Entgelte für Messstellenbetrieb, Messung und Abrechnung, der sogenannten netzbezogenen Umlagen (das heißt § 19 Absatz 2 StromNEV-Umlage, Offshore-Haftungs-Umlage gemäß § 17f EnWG und AbLaV-Umlage gemäß § 18 AbLaV), der Konzessionsabgaben, der EEG-Umlage, der KWKG-Umlage,

der Stromsteuer und der Umsatzsteuer detailliert für den Spezialfall der Speicherkapazitätsvermarktung unter Beteiligung eines Cloudbetreibers untersucht. In diesem Zusammenhang war unter anderem zu prüfen, ob Stromspeicher im Cloudmodell juristisch als Letztverbraucher eingeordnet werden können und welche Konsequenzen sich hieraus für die Zahlungspflicht ergeben. Nach dem EnWG ist als Letztverbraucher jeweils derjenige einzuordnen, der Strom für den eigenen Verbrauch kauft. Damit kann die Person des Letztverbrauchers in den meisten energierechtlichen Sachverhalten ohne Schwierigkeiten eindeutig bestimmt werden. Im Cloudmodell ist dies anders: Lediglich während der sog. Primärnutzung werden die Batteriespeicher zur Speicherung von selbst erzeugtem oder am Strommarkt erworbenem Strom eingesetzt, sodass der Primärnutzer auch als Letztverbraucher, der den Strom für den eigenen Verbrauch kauft, angesehen werden kann. Im Zeitraum der sog. Sekundärnutzung durch die Speicherkunden führt dagegen der Cloudbetreiber die Steuerung und Einsatzplanung der Speicher durch, das heißt, er bestimmt über den physikalischen Verbrauch des Stromes, ohne diesen zu kaufen. Dagegen besteht diese Problematik für die EEG-Umlage und die KWKG-Umlage nicht. Denn diese Gesetze definieren jeweils einen eigenen Letztverbraucherbegriff,

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**  
Abrechnung von dezentralen Speichern im Multi-Purpose-Betrieb (Unterauftrag green2store)

**Fördernde Stelle:**  
EWE Aktiengesellschaft

**Projektlaufzeit:**  
15.07.2015 – 30.04.2016

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr. Hartmut Weyer

**Projektkoordinatorin:**  
Dr. Franziska Lietz,  
franziska.lietz@tu-clausthal.de

für den es ausschließlich darauf ankommt, wer den Strom (physikalisch) verbraucht. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Belastungssituation bei der Bewirtschaftung von Speichern über eine Energy Storage Cloud vorteilhaft ausfallen kann, sofern bestimmte Rahmenbedingungen berücksichtigt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchung galt der Frage, ob und inwieweit der Verteilernetzbetreiber sich an einem Cloudmodell beteiligen darf. Grenzen ergeben sich diesbezüglich aus dem Entflechtungsrecht der §§ 6 ff. EnWG. Zunächst wurde untersucht, ob auch der Verteilernetzbetreiber Speicher selbst betreiben und diese in der Cloud zur Verfügung stellen darf. Hierbei war zu unterscheiden, ob der Verteilernetzbetreiber den Stromspeicher ausschließlich für Netzbetriebszwecke nutzt oder auch (überschüssige) Speicherkapazität Dritten zur Verfügung stellt. Erstmals untersucht wurde in diesem Zusammenhang auch die Frage, welche Einschränkungen gelten, wenn ein Verteilernetzbetreiber Dritten Stromspeicherkapazitäten als Infrastrukturdienstleistung zur Verfügung stellt. Behandelt wurden auch weitere Einschränkungen, insbesondere für den Bezug von Regelenergie aus einem eigenen Stromspeicher des Verteilernetzbetreibers, das heißt außerhalb des gesetzlich organisierten Regelenergiemarktes. In einer weiteren Fragestellung war zu prüfen, ob der Stromspeicherbetreiber als Nutzer von Speichern der Energy-Storage-Cloud zu Zwecken des Netzbetriebs auftreten darf. Hieran anschließend war der Frage nachzugehen, ob und inwieweit der Verteilernetzbetreiber die für die Nutzung des Speichers angefallenen Kosten über die Netzentgelte umlegen kann.



Hartmut Weyer



Franziska Lietz

## SINTEG-Projekt enera: Analyse aktueller energiewirtschafts- rechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft

### Kurzfassung

Das Vorhaben „Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft“ dient der Untersuchung energiewirtschaftsrechtlicher Aspekte in dem vom BMWi geförderten Demonstrationsvorhaben „enera“, einem der fünf Projekte des SINTEG-Programms. Das enera-Projekt wird in enger Zusammenarbeit von 32 Konsortialpartnern aus Wirtschaft und Wissenschaft unter Beteiligung weiterer 32 assoziierter Partner durchgeführt. In rechtlicher Hinsicht liegen die Schwerpunkte der Analyse auf der Fortentwicklung des Verhältnisses von Netzbetrieb und Energiemarkt vor dem Hintergrund der fortschreitenden Energiewende und auf den Möglichkeiten einer stärkeren Regionalisierung des Stromversorgungssystems. Weitere juristische Fragestellungen werden im Rahmen der konkreten Ausgestaltung des Demonstrationsvorhabens entstehen.

### Abstract

The project “Analysis of the current legal framework for the energy industry and proposals for future adjustments” will analyse aspects of energy law within the comprehensive demonstration project “enera”, which is one of the five projects of the SINTEG program sponsored by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. The enera project is realized in close cooperation of 32 partners from industry and science and with the collaboration of another 32 associated partners. From a legal point of view, the focus of the analysis is placed on the further development of the relationship between grid operation and energy market in the light of the progressing transformation of the energy system and on the possibilities of a more regionalized energy system. Other legal questions will arise with the specific configuration of the demonstration project.

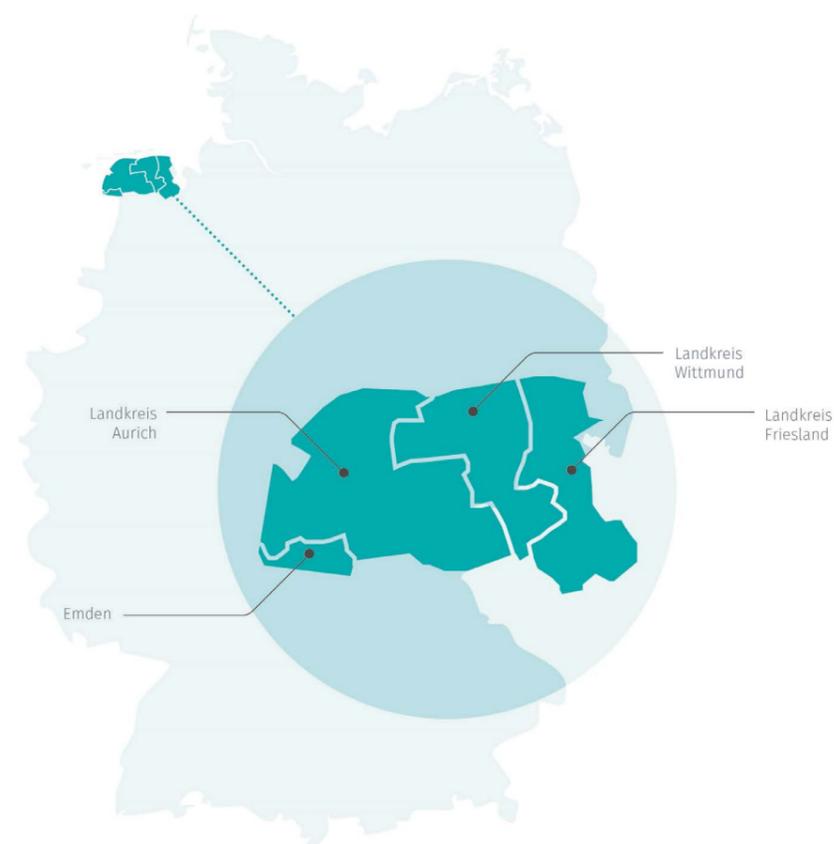
### Projektbeschreibung

Das Projekt „Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft“ bildet ein Teilvorhaben innerhalb des vom BMWi im Rahmen der SINTEG-Ausschreibung („Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“) geförderten Verbundprojekts „enera“. Der Bearbeitungszeitraum läuft nach einer mehrjährigen Planungsphase vom 1.1.2017 bis zum 31.12.2020. Leiter des Teilprojektes ist Prof. Dr. Hartmut Weyer, Direktor des Instituts für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (IBER) der TU Clausthal, die Bearbeitung erfolgt durch Dr. Franziska Lietz.

Das Verbundprojekt „enera“ ist ein sehr umfangreiches Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben mit 32 Konsortialpartnern und weiteren 32 assoziierten Partnern, das sich selbst als Praxisgrößtest für die Energiewende in Deutschland versteht. Die stark von der Erzeugung von Onshore- und Offshore-Windenergie geprägte Modellregion des Demonstrationsvorhabens liegt im nordwestlichen Küstenbereich Deutschlands und besteht aus den drei Landkreisen Aurich, Friesland und Wittmund sowie der kreisfreien Stadt Emden. In dem Ver-

### Projektpartner:

- EWE Aktiengesellschaft, Oldenburg (Konsortialführer) und andere.  
[www.energie-vernetzen.de](http://www.energie-vernetzen.de)



bundprojekt werden wesentliche Innovationen bei der Netzbetriebsführung durch einen Smart Grid Operator, beim Einsatz regionalisierter Produkte und bei der Anpassung des Energieversorgungssystems an eine große Anzahl dezentraler flexibler Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen sowie Speicher erprobt. Aufgrund der Neuartigkeit der gewählten Ansätze im Verbundvorhaben ergeben sich für das Projekt „Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft“ ein Vielzahl juristischer Fragestellungen. Untersucht werden in engem Austausch mit den Projektpartnern die rechtlichen Anforderungen und Spielräume für Maßnahmen, die im Gesamtvorhaben zur Weiterentwicklung des Energieversorgungssystems vorgeschlagen werden. Aufgrund der raschen Fortentwicklung sowohl in tatsächlicher wie in rechtlicher Hinsicht – und auch im Hinblick auf europarechtliche Vorgaben – werden die Projektergebnisse während der Projektlaufzeit fortlaufend aktualisiert werden.

Einen ersten Schwerpunkt stellen die Untersuchung des energiewirtschaftsrechtlichen Rahmens für das Verhältnis von Netzbetrieb

und Energiemarkt sowie mögliche Weiterentwicklungsoptionen dar. So ist im Demonstrationsvorhaben beabsichtigt, basierend auf den erweiterten Möglichkeiten intelligenter Netze deren Betreibern, insbesondere den Verteilernetzbetreibern eine aktivere Rolle zuzuweisen. Ob dies mit dem energiewirtschaftsrechtlichen Rahmen vereinbar ist, muss geprüft werden. Absehbar sind Auswirkungen mit Relevanz für die Einhaltung der europarechtlich vorgegebenen Entflechtungsanforderungen an die Netzbetreiber. Untersucht wird insbesondere die Aufgabenzuweisung an Verteilernetzbetreiber nach geltendem Recht sowie die Möglichkeit der Weiterentwicklung im Hinblick auf die Wahrnehmung neuer Aufgaben entsprechend der im Projekt entwickelten Ansätze. Dies betrifft u.a. die Rolle der Verteilernetzbetreiber im Zusammenhang mit Messstellenbetrieb und Messung, die Anforderungen an den Netzausbau und sonstige Ertüchtigungen der Anlagen und Einrichtungen des Verteilernetzbetreibers selbst sowie dessen Möglichkeiten, das Verhalten angeschlossener Netznutzer und sonstiger Akteure unmittelbar oder mittelbar zu beeinflussen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Rolle der Stromspeicherung im geltenden und künftigen Rechtsrahmen. Im Anschluss

an die Untersuchung des derzeitigen und des zukünftig möglichen Aufgabenkreises der Verteilernetzbetreiber folgt eine Untersuchung der Kostenberücksichtigung in den Netzentgelten nach geltendem Recht sowie möglicher Weiterentwicklungen.

Einen zweiten Schwerpunkt bilden Fragen hinsichtlich einer Regionalisierung der Energieversorgung. Der geltende Rechtsrahmen sieht eine bestimmte Aufgabenverteilung zwischen Übertragungsnetzbetreiber und Verteilernetzbetreiber vor, die für die Möglichkeiten einer Regionalisierung maßgeblich ist. So ist beispielsweise die Systemverantwortung des Übertragungsnetzbetreibers auf die gesamte von ihm verantwortete Regelzone bezogen und daher im Ausgangspunkt nicht regional ausgerichtet. Soweit Maßnahmen auf Ebene der Verteilernetze erforderlich sind, steht dem Übertragungsnetzbetreiber dagegen in der Regel kein eigenes Zugriffsrecht zu. Auch die für die jeweils handelnden Akteure verfügbaren Informationen spielen in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. So können sich widersprechende Maßnahmen von Übertragungsnetzbetreiber und Verteilernetzbetreiber nicht immer ausgeschlossen werden, etwa wenn die Anforderung von Regelleistung durch den Übertragungsnetzbetreiber aufgrund von Netzengpässen auf Verteilernetzebene nicht umsetzbar ist. Weitere Fragestellungen ergeben sich im Hinblick auf die Zuständigkeiten für den Bilanzausgleich und diesem vorgelagerte Maßnahmen sowie die Verantwortung für das Engpassmanagement. Es erfolgt daher eine Bestandsaufnahme der Befugnisse von Übertragungsnetzbetreiber und Verteilernetzbetreiber nach geltendem Recht vor dem Hintergrund der im Verbundprojekt angestrebten Maßnahmen. Darauf aufbauend werden in enger Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium Weiterentwicklungsoptionen untersucht.

Eine besondere Bedeutung für eine Regionalisierung der Stromversorgung kommt schließlich Stromspeichern zu, da diese zu einem regionalen Bilanzausgleich beitragen, für die Erbringung regionalisierter Systemdienstleistungen herangezogen werden und im Rahmen des Engpassmanagements eingesetzt werden können. Insofern bildet die Ermittlung des energiewirtschaftlichen Rahmens für den Einsatz von Stromspeichern im Rahmen einer regionalisierten Stromversorgung eine der Grundlagen für die Entwicklung und Umsetzung innovativer Konzepte im Rahmen des Demonstrationsvorhabens.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

ENERA – Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

O3SIN307

### Projektlaufzeit:

01.01.2017 – 31.12.2020

### Berichtszeitraum:

01.01.2017 – 31.12.2017

### Verantw. Projektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

### Projektkoordinatorin:

Dr. Franziska Lietz,  
franziska.lietz@tu-clausthal.de



Hartmut Weyer



Franziska Lietz

## Epitaktische Abscheidung oxidischer piezoelektrischer Schichten

### Projekthintergrund

Piezoelektrische Sensoren und Aktoren für den Einsatz bei hohen Temperaturen (500-1000 °C) sind vor allem in der Luft- und Raumfahrt sowie Automobil- und Kraftwerksindustrie von hoher Bedeutung. Sie können als Wandler in einer Vielzahl von Geräten eingesetzt werden. Dies umfasst Gassensoren, Drucksensoren und Filter bei niedrigen oder hohen Frequenzen. Heutzutage sind piezoelektrische Schichten, die in MEMS verwendet werden, nicht in der Lage, bei Temperaturen oberhalb von 600 °C zu arbeiten. Folglich werden im Rahmen dieses Projekts Untersuchungen an hochtemperaturstabilen Resonatoren und Schichten zur In-situ-Überwachung und Steuerung von Prozessen in einem breiteren Temperaturbereich ausgeführt. Seit 2001 werden auf Langasit-Einkristallen (LGS) basierende (Mikro-)Resonatoren in reduzierenden oder oxidierenden Gasatmosphären intensiv bei hohen Temperaturen untersucht. Ausgewählte Materialeigenschaften und verschiedene Anwendungen sind bereits bekannt. Zum Beispiel haben Wissenschaftler des Energieforschungszentrums (EFZ) und des Instituts für Energieforschung und Physikalische

Technologien der TU Clausthal erfolgreich ein Hochtemperatur-Dünnschicht-Kalorimeter entwickelt und realisiert.

Das Hauptziel dieses Projektes besteht darin, hochtemperaturstabile MEMS-Elemente durch Abscheidung von piezoelektrischen Oxidmaterialien auf verschiedenen Substraten zu entwickeln.

### Grundkonzept

Resonatoren aus Langasit (LGS,  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) können bis zum Phasenübergang bei 1470 °C zu akustischen Volumenwellen angeregt werden. LGS zeigt als Volumenschwinger auch unter extremen Umgebungen sehr gute elektrische und mechanische Eigenschaften. Die resonante Mikrowaage ist die bekannteste Anwendung, welche industrielle Parameter in-situ überwachen kann. Miniaturisierte Resonatoren können sehr kleine Massenänderungen während der Schichtablagerung mit der Frequenzverschiebung korrelieren. Normalerweise wird das Substrat mit schlüsellochförmigen Platin-Rhodium-Elektroden beschichtet. Auf den Elektroden wird die Sensorschicht oder Testsubstanz aufgebracht.

Um fortgeschrittene MEMS-Geräte auf Basis aktueller Materialkenntnisse von LGS zu entwickeln, werden folgende Zielstellungen bearbeitet:

- Homoepitaktische Abscheidung von dotierten LGS-Schichten auf einkristallinen LGS-Substraten mittels Laserablation und die entsprechende Charakterisierung.
- Heteroepitaktische Abscheidung von LGS-Schichten auf SiC und Si-Einkristallen, da das System für Sensorstrukturen bei hohen Temperaturen geeignet ist und die Erzeugung von Schichten mit hoher Dielektrizitätskonstante ermöglicht.

Zwei einfache Demonstratoren werden dabei betrachtet (Abbildung 1).

Ein Langasit-Resonator mit monolithischen Elektroden wird als Demonstrator hergestellt und charakterisiert. Als Elektroden dienen

### Beteiligte Institute

- Energie-Forschungszentrum (EFZ)
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)

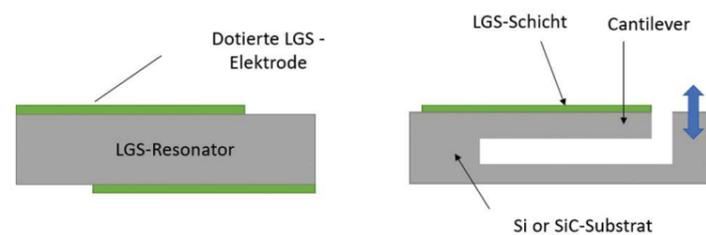


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Resonators mit monolithischen Strukturen (links) und eines Biege-Schwingers (rechts).

strontiumdotierte LGS-Schichten, die auf beiden Seiten eines LGS-Resonators abgeschieden werden. Da Elektrode und Substrat praktisch den gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten haben, weist dieser Aufbau minimale thermische Spannungen auf und ist damit sehr robust. Ein anderer Demonstrator wird durch heteroepitaktisches Wachstum von LGS auf SiC beziehungsweise Si realisiert. SiC ist ebenfalls ein hochtemperaturstabiles Material zur Erzeugung von Elektronikkomponenten, Sensoren und Aktoren. Mit Hilfe von LGS-Schichten soll ein SiC- beziehungsweise Si-Biegeschwinger hergestellt und charakterisiert werden.

### Bisherige Forschungsaktivitäten

- Optimierung der Abscheidungsparameter und Charakterisierung der Schichten  
Die gepulste Laserablation wird für die Schichtabscheidung verwendet. Der Zusammenhang zwischen Stöchiometrie der Schichten und Abscheidungsparametern wie Wachstumsgeschwindigkeit, Pulswiederholrate, Pulsenergie, Substrattemperatur, Atmosphäre und Zusammensetzung der Targetmaterialien sind wesentliche Untersuchungsergebnisse (Abbildung 2). Ein „Standardparametersatz“ wird festgelegt. Zur Charakterisierung erfolgt folgende Auswertung:
  - Bestimmung der Wachstumsrate, der Stöchiometrie und der Rauheit der abgeschiedenen piezoelektrischen Schichten.
  - Bestimmung der Art und des Ausmaßes der Kristalldefekte der abgeschiedenen Materialien.
  - Chemische und strukturelle Untersuchung der Grenzfläche zwischen Substraten und Schichten sowie Charakterisierung von thermischen Belastungen bei Temperaturänderungen (Abbildung 3).

- Elektrische und elektromechanische Eigenschaften der Schichten  
Die Wirkung der Dotierung wird durch die Messung der Leitfähigkeit untersucht. Eine dünne Schicht von dotiertem LGS wird dazu auf einem Substrat mit hohem Widerstand (Saphir: einkristallines  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) abgeschieden und die Leitfähigkeit in einem Ofen von 200 °C bis 1000 °C in Luft mit einem Mikroim-

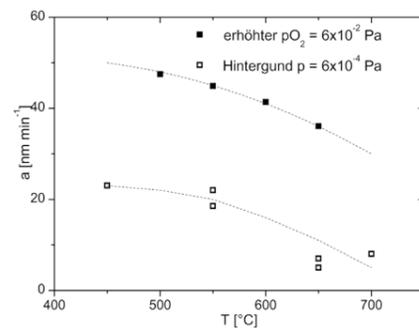


Abbildung 2: Wachstumsgeschwindigkeit von LGS-Schichten auf LGS-Substraten als Funktion der Substrattemperatur bei unterschiedlichen Drücken.

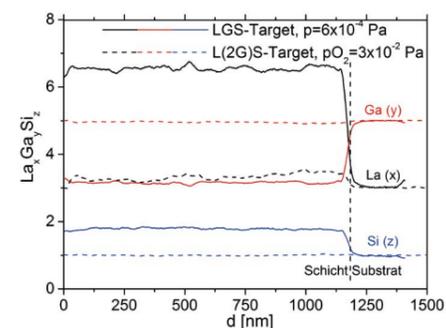


Abbildung 3: Verhältnis von La, Ga und Si in zwei LGS-Schichten als Funktion der Tiefe  $d$  (SNMS).

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**  
Epitaktische Abscheidung oxidischer piezoelektrischer Schichten

**Fördernde Stelle:**  
Deutsche Forschungsgemeinschaft

**Förderkennzeichen:**  
FR1301/20-1

**Projektlaufzeit:**  
01.04.2015–31.03.2018

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

**Projektkoordinator:**  
M.Sc. Li Zhao,  
li.zhao.1@tu-clausthal.de

**Internet:**  
<http://gepris.dfg.de/gepris/projekt/262765916>

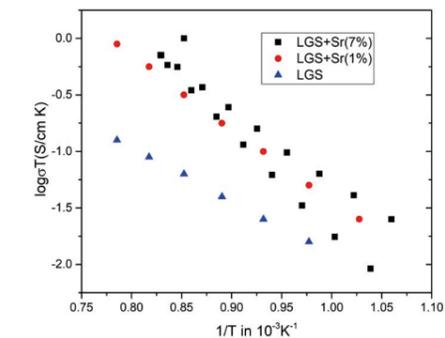


Abbildung 4: Elektrische Leitfähigkeit von Langasit mit und ohne Dotierung.

pedanz-Messplatz (Frequenzbereich von 1 Hz bis 1 MHz) gemessen. Abbildung 4 zeigt die durch Dotierung deutlich erhöhte Leitfähigkeit.

Weiterhin werden die Resonanzeigenschaften eines monolithischen Resonators untersucht. Zu diesem Zweck werden Real- und Imaginärteil der Impedanzspektren mit einem Hochgeschwindigkeitsnetzanalysator im Bereich der entsprechenden Resonanzfrequenzen gemessen (5 MHz). Anschließend werden die Daten in die Admittanz umgewandelt. Das Maximum des Realteils wird durch Lorentz-Funktion bestimmt und als (Serien-) Resonanzfrequenz  $f$  interpretiert. Der Q-Faktor wird bei jeder Temperatur durch das Verhältnis von Resonanzfrequenz und Frequenzbandbreite bei halbem Maximum der Konduktanz berechnet.

### Zugehörige Publikationen

- R. Feder, D. Spemann, H. Fritze, „PLD zur epitaktischen Abscheidung hochtemperaturstabiler piezoelektrischer Funktionsschichten“, Vortrag, 23. Erfahrungsaustausch Oberflächentechnologien mit Plasma- und Ionenstrahlprozessen, Mühlleithen, 15.03.-17.03.2016.
- R. Feder, H. Fritze, „Abscheidung von Langasit mittels Laserablation zur Herstellung hochtemperaturstabiler piezoelektrischer Sensorschichten“, Poster und Vortrag, Sensoren und Messsysteme 2016, Nürnberg, 10.05.-11.05.2016.
- R. Feder, H. Fritze, „Homo-Epitaxial Deposition of Piezoelectric Langasite Thin Films“, Vortrag, Materials Since and Engineering, Darmstadt, 27.09.-29.09.2016.



Holger Fritze

Li Zhao

# Konzentrationsabhängige Industrieofenregelung – Teilvorhaben: Sensorschicht- und Sensorentwicklung im Labormaßstab

## Projekthintergrund

Ziel des Verbundprojektes „Konzentrationsabhängige Industrieofenregelung“ ist die Entwicklung einer Technologie, die eine energieeffiziente Steuerung und Regelung von elektrisch beheizten Wärmebehandlungsprozessen ermöglicht. Die Regelung basiert auf der Messung der Atmosphärenzusammensetzung im Ofen, die einen direkten Rückschluss auf den Bauteilzustand in der Anlage zulässt. Diese bauteilbezogene Steuerung von Industrieöfen verspricht eine Optimierung des Fertigungsverfahrens, in dem Betriebstemperaturen direkter angefahren werden können. Insgesamt errechnet sich daraus eine Energieeinsparung von 25–30 Prozent für Wärmebehandlungsprozesse.

Das Verbundprojekt wird vom Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Dresden koordiniert und in Zusammenarbeit mit drei mittelständischen Industriepartnern bearbeitet. Am Energieforschungszentrum (EFZ) wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien der TU Clausthal das Teilvorhaben „Sensorschicht- und Sensorentwicklung im Labormaßstab“ umgesetzt. Ziel dieses Teilprojektes ist die Realisierung eines Sensors, der Konzentrationsänderungen bestimmter Schlüsselgasspezies bis in den Hochtemperaturbereich (1150 °C) detektieren kann.

## Grundkonzept

Resistive Metalloxidgassensoren, deren elektrische Leitfähigkeit von adsorbierenden/desorbierenden Gasmolekülen der Atmosphäre abhängt, sind bei hohen Temperaturen einsetzbar, in oxidierender und reduzierender Atmosphäre stabil und ermöglichen eine elektrische Verarbeitung des Sensorsignals. Sie weisen jedoch eine zu geringe Gasselektivität auf, um den Konzentrationsverlauf prozessspezifischer Schlüsselgasspezies überwachen zu können. Aus diesem Grund soll ein Sensorprinzip

zum Einsatz kommen, welches die Selektivität metalloxidbasierter Gassensoren erhöht, in dem neben den elektrischen auch mechanische Eigenschaften der Sensorschicht mit Hilfe einer hochtemperaturstabilen resonanten Mikrowaage bestimmt werden.

Als resonante Mikrowaage kommen planare, einkristalline, piezoelektrische Langasit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) oder Kantagazit ( $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ ) Substrate in Frage, die zu Dickenscherschwingungen angeregt werden können. Dazu werden sie mit schlüssellochförmigen Platin-Rhodium-Elektroden beschichtet. Auf den Elektroden wird die Sensorschicht aufgebracht (siehe Abbildung 1). Ein solcher Aufbau wird als Resonator bezeichnet. Durch Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung können Volumenwellen im Resonator angeregt werden. Die elektrische Antwort dieses Systems zeigt ein Maximum der Konduktanz (Realteil der elektrischen Leitfähigkeit), wenn sich der Resonator in mechanischer Resonanz befindet. Die zugehörige Frequenz wird als Serien-Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  bezeichnet. Sie ist im Allgemeinen von der Temperatur und von der Massenbelastung abhängig. Die fortlaufende Messung der Serien-Resonanzfrequenz erlaubt es, Änderungen der Sensorschichten auszuwerten und auf

### Projektpartner

**Projektkoordination:**

- Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung

**Beteiligte Institute:**

- Energie-Forschungszentrum (EFZ)
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)

**Externe Partner:**

- SGL Carbon GmbH
- Element 22 GmbH
- MUT Advanced Heating GmbH

Konzentrationsänderungen der Schlüsselgase zurückzuschließen.

Das Elektroden- und Schichtlayout ermöglicht es, mechanische und elektrische Veränderungen einer Sensorschicht zu unterscheiden. Ist der Durchmesser der Sensorschicht kleiner als der Elektrodendurchmesser (siehe Abbildung 1, links), tragen im Wesentlichen Änderungen der Massenbelastung, zum Beispiel durch adsorbierende/desorbierende Gase, zu detektierbaren Resonanzfrequenzänderungen bei. Überlappt die Sensorschicht den Elektrodendurchmesser wie in Abbildung 1, rechts, dann führen Änderungen der Sensorschichtleitfähigkeit, hervorgerufen durch Interaktionen der Sensorschicht mit der umgebenden Gasatmosphäre, ebenfalls zu einer Änderung der Serien-Resonanzfrequenz. Die Änderung wird verursacht durch die näherungsweise gaußförmige Amplitudenverteilung der Schwingung. Die Masse der Elektroden wirkt sich bei verbreitertem Elektrodendurchmesser stärker auf die Schwingung aus.

## Bisherige Forschungstätigkeiten

### Auswahl möglicher Sensorschichten

Auf der Grundlage optischer und massenspektroskopischer Untersuchungen sind Methan ( $\text{CH}_4$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Ethen ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) als Schlüsselgasspezies identifiziert worden. Jede Schlüsselgasspezies wird in einem bestimmten Temperaturbereich der Wärmebehandlungsprozesse vermehrt freigesetzt. Anhand der erforderlichen Schlüssel-

gase und Temperaturbereiche müssen die oxidischen Sensorschichten ausgewählt werden.

Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden geeignete Kandidaten für die Sensorschichten identifiziert, die im weiteren Projektverlauf untersucht werden sollen.

### Massenänderung dünner Praseodym dotierter Ceroxid-Schichten in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes

Praseodym dotiertes Ceroxid ( $\text{Pr}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-\delta}$ ) kann in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes Sauerstoffatome aufnehmen oder abgeben. Verglichen mit anderen oxidischen Materialien erreichen dünne PCO-Schichten relativ hohe Sauerstoffdefizite ( $\delta$  größer als 0,05) bereits bei vergleichsweise hohen Sauerstoffpartialdrücken von  $10^{-0,7}$  bar bis  $10^{-6}$  bar. Massenänderungen der Schicht, die sich aus der Aufnahme oder Abgabe von Sauerstoff ergebenden, sind mittels Langasit basierter Mikrowaage detektierbar. Abbildung 2 zeigt gemessene Sauerstoffdefizite für eine  $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,9}\text{O}_{2-\delta}$  Schicht von 1  $\mu\text{m}$  gemessen bei 700 °C.

Die Messungen zeigen, dass Masseänderungen der  $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,9}\text{O}_{2-\delta}$  Schicht von 0,2  $\mu\text{g}$  detektierbar sind. Die Änderungen der temperaturkompensierten Resonanzfrequenz sind bis zu einem Sauerstoffpartialdruck von  $10^{-5}$  bar am größten. Schwankungen der temperaturkompensierten Resonanzfrequenz könnten verringert werden, in dem einkristalline (Y-Schnitt) Kantagazit Substrate verwendet werden. Bei 700 °C und einem Elektrodendurchmesser von 5 mm kön-

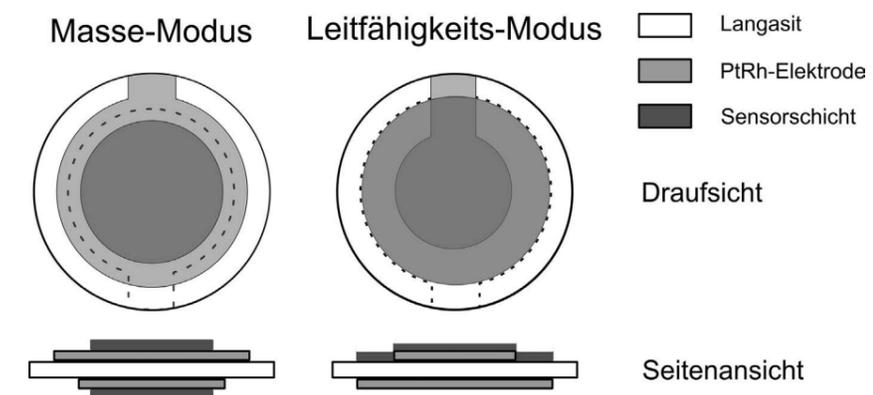


Abbildung 1: Schichtabfolge zur Unterscheidung mechanischer (Masse-Modus; Links) und elektrischer (Leitfähigkeitsmodus; Rechts) Änderungen der Schichteigenschaften zur Selektivitätssteigerung in der Gassensoren.

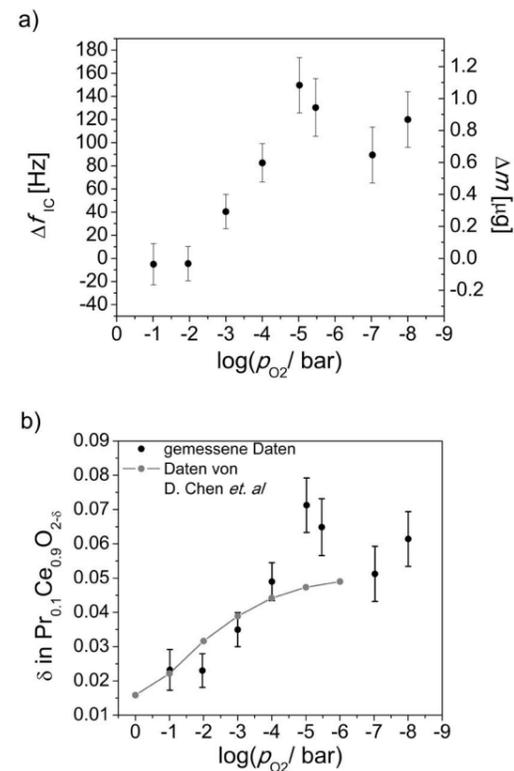


Abbildung 2: Variation des Sauerstoffpartialdrucken zwischen  $10^{-1}$  bar und  $10^{-8}$  bar für einen beidseitig beschichteten Langasit Resonator bei  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . a) Frequenzsprünge und Massenänderungen b) Sauerstoffdefizit.

nen mit einem 3,7 MHz Resonator Massenänderungen bis ca.  $0,05\text{ }\mu\text{g}$  detektiert werden.

### Zugehörige Publikationen

Langasite-based Microbalance for the Determination of the Non-Stoichiometry in Praseodymium-Cerium Thin Films at Elevated Temperatures

Sebastian Schröder, Holger Fritze

Proceedings Sensor 2017, 98-103 (2017); DOI: 10.5162/sensor2017/A4.4

## Daten zum Projekt

**Vorhabenbezeichnung:**  
Konzentrationsabhängige  
Industrieofenregelung –  
Teilvorhaben: Sensorschicht- und  
Sensorentwicklung im Labormaßstab

**Fördernde Stelle:**  
Bundesministerium für  
Wirtschaft und Energie

**Förderkennzeichen:**  
03ET1467B

**Projektlaufzeit:**  
01.12.2016 bis 30.11.2019

**Berichtszeitraum:**  
01.12.2016 bis 30.06.2017

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

**Projektkoordinator:**  
M.Sc. Sebastian Schröder,  
sebastian.schroeder@tu-clausthal.de

**Internet:**  
[www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=4222259&v=10&q=KonAIR](http://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=4222259&v=10&q=KonAIR)



Holger Fritze

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

### Zusammenfassung

In dem DFG-Schwerpunktprogramm 1473 „WeNDeLIB“ wird ein neuartiges, kalorimetrisches Messverfahren (Hochtemperatur-Dünnschichtkalorimetrie) entwickelt, um dünne Schichten und Schichtsysteme auf ihre thermodynamischen und kinetischen Eigenschaften bis in den Hochtemperaturbereich von  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu charakterisieren. Die Basis für das Messsystem bilden dabei piezoelektrische, planare Temperatursensoren aus hochtemperaturstabilen Langasit-Einkristallen. Die zu untersuchenden Materialien werden auf den Elektroden der Sensorelemente aufgebracht. Dabei wird die Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz der Sensoren genutzt, um thermisch induzierte Temperaturänderungen zu detektieren. Gleichzeitig ermöglicht die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Massenbelastung eine hochpräzise Bestimmung der Schichtmassen (Auflösung  $< 1\text{ }\mu\text{m}$ ). Somit lassen sich nicht nur kinetische Einsatzgrenzen und thermodynamische Stabilität von z.B. Lithium-Ionen-Batteriematerialien bis zur Synthesetemperatur quantifizieren, sondern auch gravimetrische Effekte, wie z. B. Massenverluste der Aktivmaterialien.

### Abstract

In the DFG priority program 1473 "WeNDeLIB" a novel calorimetric measuring method (High-Temperature Thin-Film Calorimetry) is developed for the characterization of thermodynamic and kinetic properties of thin films and multilayered thin-film systems up to the high-temperature range of  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The measurement system is based on piezoelectric, high-temperature stable langasite single crystals which serve as planar temperature sensors. Active materials of interest are deposited on the electrodes of the sensor elements. The temperature dependence of the resonance frequency of such sensors is used to detect thermally induced temperature changes. At the same time the masses of the deposited thin films are determined with high precision down to the microgram range, due to the dependence of the resonance frequency on the deposited mass load. Thus, the Thin-Film Calorimetry, is used for measurements of kinetic limits of use and thermodynamic stability of e. g. lithium-ion battery materials and it also allows for the simultaneous characterization of gravimetric effects, such as mass losses of the active materials up to its synthesis temperatures.

### Projektpartner

#### Projektkoordination:

- Energie-Forschungszentrum der TU Clausthal und Karlsruhe Institute of Technology

#### Beteiligte Institute:

- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)

#### Externe Partner:

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

### 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 (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

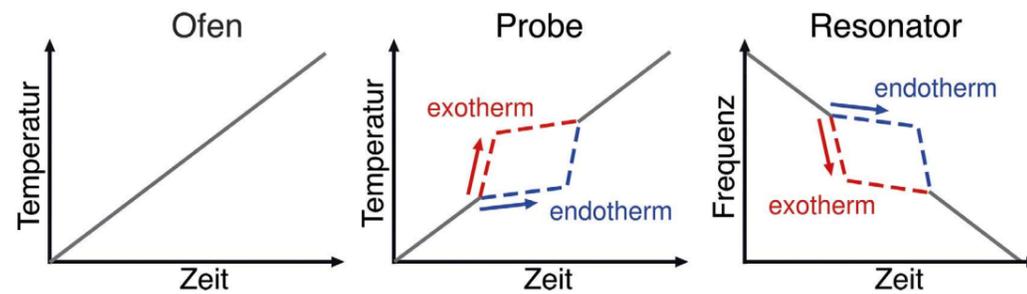


Abbildung 1: Schematisches Messprinzip der Dünnschichtkalorimetrie

werden zur Herstellung von Lithiumbatterien mit hoher Kapazität und langer Lebensdauer benötigt. Im Rahmen dieses Projektes wird mit der Dünnschichtkalorimetrie ein neues Messverfahren realisiert, das die Untersuchung der Temperatur und der Enthalpie von Phasenübergängen als Funktion der Zusammensetzung und des Lithiumgehaltes 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 1,2 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 Batterieprojekten des EFZ einsetzbar sind.

### Forschungstätigkeiten

#### Dünnschichtkalorimetrie auf der Basis hochtemperaturstabiler piezoelektrischer Langasit-Einkristalle

Ein Hauptaspekt der Forschungstätigkeit lag auf dem Aufbau und der Etablierung des neu entwickelten Messverfahrens „Dünnschichtkalorimetrie“. 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-Netzwerkanalysators kontinuierliche Frequenzänderungen detektiert werden.

Ein ungestörter Resonator aus dem hier verwendeten Langasit ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ) zeigt bei kon-

tinuierlicher 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, 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 Dünnschichtkalorimeters im Bereich der Untersuchung von Batteriematerialien 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 weitestgehend ausgeschlossen.

Getestet wurde das Messverfahren „Dünnschichtkalorimetrie“ zunächst mit diversen Materialien, deren kalorimetrische Eigenschaften bekannt sind, um Referenzwerte zu erlangen. Da die gemessenen Enthalpien sehr gut mit Literaturwerten übereinstimmen, ist die prinzipielle Funktionalität des im Zuge dieses Projektes aufgebauten Systems nachgewiesen und es kann für neue zu untersuchende Materialien angewendet werden.

#### Aufbau eines erweiterten Dünnschicht-Kalorimeters

Nach der Etablierung der Funktionalität des Messverfahrens „Dünnschichtkalorimetrie“ wurde im Zuge der Verlängerung des Projektes

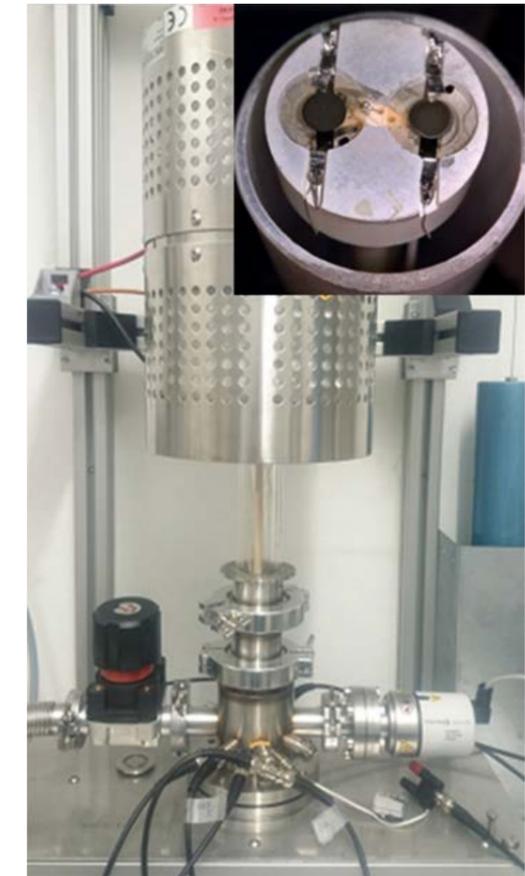


Abbildung 3: Fotografie des zweiten Dünnschichtkalorimeters mit Rohrofen in Messposition; der Einsatz zeigt den Doppelprobenhalter mit zwei eingebauten Resonatoren

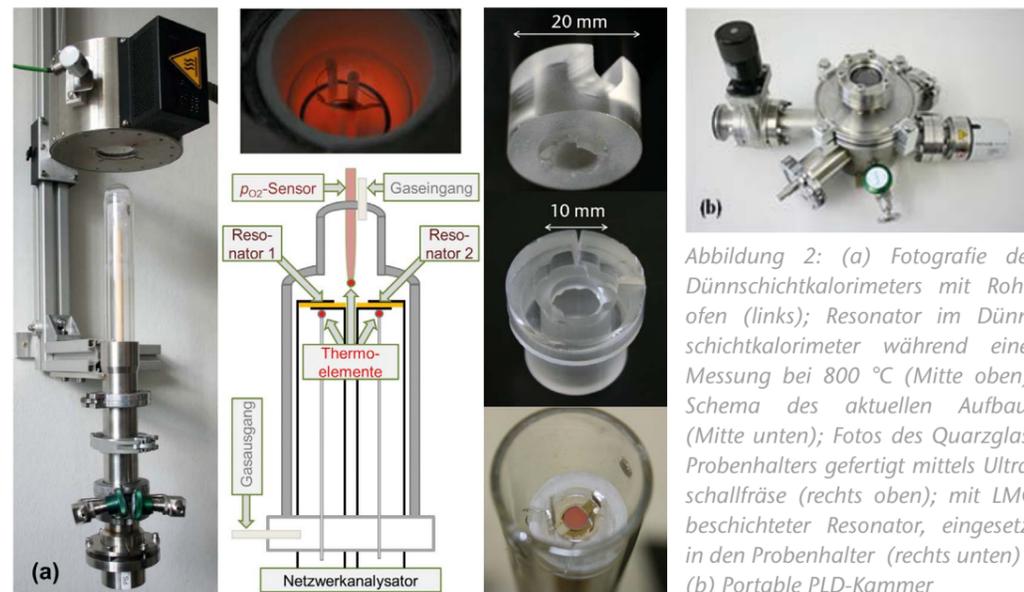


Abbildung 2: (a) Fotografie des Dünnschichtkalorimeters mit Rohrofen (links); Resonator im Dünnschichtkalorimeter während einer Messung bei 800 °C (Mitte oben); Schema des aktuellen Aufbaus (Mitte unten); Fotos des Quarzglas-Probenhalters gefertigt mittels Ultraschallfräse (rechts oben); mit LMO beschichteter Resonator, eingesetzt in den Probenhalter (rechts unten). (b) Portable PLD-Kammer

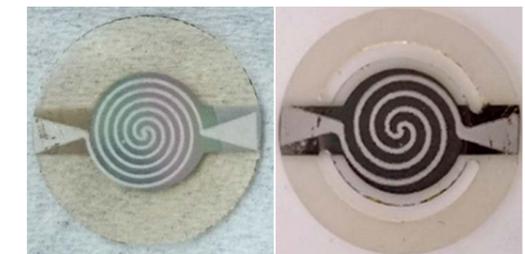


Abbildung 4: (links) Resonator mit Pt-Heizstruktur; (rechts) freistehender Resonator, ebenfalls mit einer Pt-Heizstruktur beschichtet; der aktiv schwingende Bereich ist hierdurch thermisch und mechanisch entkoppelt.

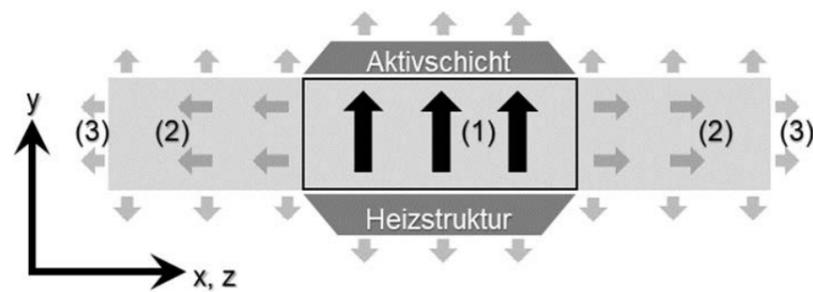


Abbildung 5: Schema der möglichen Wärmeflüsse im Resonator/Temperatursensor: (1) Wärmeübertragung von der Heizstruktur oder der Aktivschicht in das Volumen unterhalb der Elektrode; (2) Radialsymmetrische Wärmeübertragung in das äußere Sensorvolumen; (3) Wärmeübertragung in die Umgebung.

ein zweites Dünnschichtkalorimeter aufgebaut (Abbildung 3). 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  $\pm 0,05$  K auftreten.

Des Weiteren wurde das zweite Dünnschichtkalorimeter mit einem größeren Probenhalter ausgerüstet (Abbildung 3, Einsatz), 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. Weiterhin kann eine der Proben als Referenz dienen. Außerdem ist das Messsystem mit einem Nernst-Sensor ausgestattet, der zur Überwachung und Kontrolle des Sauerstoffpartialdrucks an den Proben dient. Durch die Verwendung einer externen Sauerstoffpumpe in Kombination mit dem am Probenhalter integrierten Nernst-Sensor lässt sich der Sauerstoffpartialdruck im Bereich von  $10^{-3}$ – $10^{-24}$  bar einstellen. Dies ist vor allem bei der Vermessung von Proben mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Sauerstoff ein Vorteil, da über den gesamten Temperaturbereich von RT–1000 °C eine definierte Atmosphäre vorgegeben werden kann, die erforderlichenfalls eine unerwünschte Oxidation unterdrückt.

#### Thermodynamische Charakterisierung der Sensorelemente und Empfindlichkeitsverbesserung

Für eine präzise thermodynamische Charakterisierung des Sensorelementes wird das Resonanzverhalten der eingesetzten Resonatoren unter Zugabe von definierten Energiemengen untersucht. Hierfür werden zunächst die mittels PLD aufgebrauchten Elektroden mit einer dünnen Schicht aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) elektrisch isolierend abgedeckt, so dass dann mittels Siebdruck spiralförmige Platin-Heizstrukturen aufgebracht werden können (Abbildung 4). Bei Temperaturen, an denen Phasenumwandlungen in interessierenden Schichtsystemen auftreten, werden definierte Wärmepulse an diese Strukturen angelegt. Damit werden Wärmemengen bzw. Frequenzsprünge, die durch Aktivschichten ausgelöst werden, simuliert und die Wärmedissipation/Wärmeübertragung innerhalb eines Resonators bestimmt. In Abbildung 5 ist eine Skizze eines Resonators dargestellt und die beteiligten Wärmeübertragungsprozesse sind mit Pfeilen gekennzeichnet. Dabei kann die Wärmeübertragung in y-Richtung durch Wärmeleitung von einer Aktivschicht oder einer Heizstruktur in den Resonator als ein näherungsweise adiabatischer Prozess betrachtet werden. Die zugehörige Zeitkonstante beträgt  $\tau_{y,\text{Wärmeleitung}} \approx 0,2$  s.

Aus Abbildung 6 lassen sich die Resonanzfrequenzantworten  $\Delta f_r$  des LGS-Resonators bei 232 °C (Schmelzpunkt von Zinn) nach Wärmepulsen im Vakuum und in Argonatmosphäre gewinnen. Durch den Wärmepuls wird eine Temperaturerhöhung im Sensor induziert. Das Anfitzen einer Summe von exponentiellen Zerfallsfunktionen erlaubt die Identifikation der

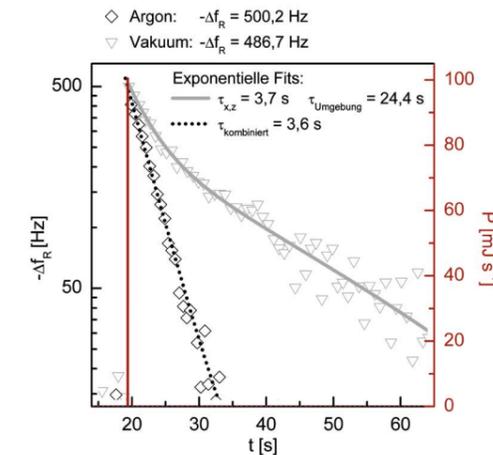


Abbildung 6: Resonanzfrequenzänderung  $\Delta f_r$  eines LGS-Resonators nach der Zugabe eines Wärmepulses  $P$  im Vakuum und in Argonatmosphäre

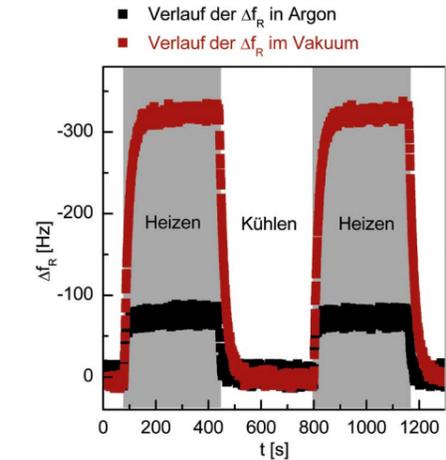


Abbildung 7: Resonanzfrequenzänderung  $\Delta f_r$  eines LGS-Resonators bei 232 °C im Vakuum und in Argon Atmosphäre, geheizt mit  $4,1$  mJ s $^{-1}$  bis fast zum thermischen Gleichgewicht

beteiligten Wärmeübertragungsprozesse und die Bestimmung der zugehörigen Zeitkonstanten. Im Vakuum lassen sich der radialsymmetrischen Wärmeverteilung und der Wärmeübertragung in die Umgebung die Zeitkonstanten  $\tau_{x,z} = (3,7 \pm 0,2)$  s und  $\tau_{\text{Umgebung}} = (24,4 \pm 0,2)$  s zuordnen. In der Argonatmosphäre ist der Wärmeverlust durch den Wärmeaustausch des gesamten Resonators mit der Umgebungsatmosphäre in der gleichen Größenordnung wie die radialsymmetrische Wärmeverteilung. Somit lässt sich nur eine kombinierte Zeitkonstante  $\tau_{\text{kombiniert}} = (3,6 \pm 0,1)$  s bestimmen. Um die Verluste durch die Argonatmosphäre quantitativ zu bestimmen und langandauernde Phasenübergänge zu simulieren, wird der Resonator kontinuierlich bis fast zum thermischen Gleichgewicht geheizt (Abbildung 7).

Um das Messverfahren zu optimieren, werden mit einer Ultraschallfräse „freistehende Resonatoren“ (FSR) hergestellt, deren schwingender Bereich vom Rest des Resonators weitgehend thermisch und mechanisch entkoppelt ist (Abbildung 4, rechtes Foto). Durch die Entfernung des Materials um die Elektrode wird die Mantelfläche, über die die Wärmeübertragung verläuft, minimiert. Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der Verluste durch Wärmedissipation und geht somit mit einer verbesserten Sensitivität des FSR-Temperatursensors einher. Die Zeitkonstante für die Wärmedissipation beträgt in diesem Fall  $\tau_{x,z,\text{FSR}} (17,4 \pm 0,2)$  s im Vakuum. Somit bietet die thermische Entkopplung des FSR in Kombination mit einer Vermeidung von Wärmeaustausch mit einer Umgebungsatmosphäre (Messung im Vakuum) eine drastische Erhöhung der Sensitivität des Systems.

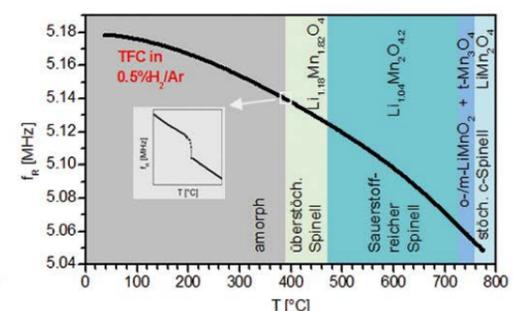
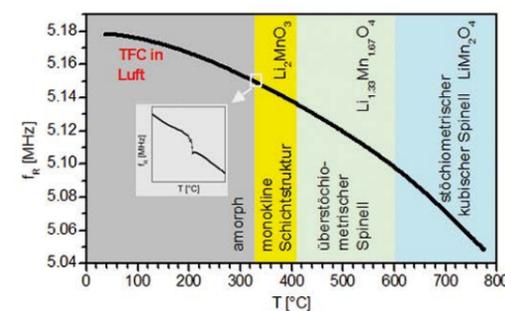


Abbildung 8: Temperaturverlauf der Resonanzfrequenz eines mit LMO beschichteten Resonators in Luft (links) und 0,5 %  $\text{H}_2/\text{Ar}$  (rechts). Die Inlays zeigen Vergrößerungen der Frequenzsprünge in den Resonanzfrequenz-Temperatur-Messkurven an den jeweils ersten Phasenübergängen (jeweils ein Beispiel).

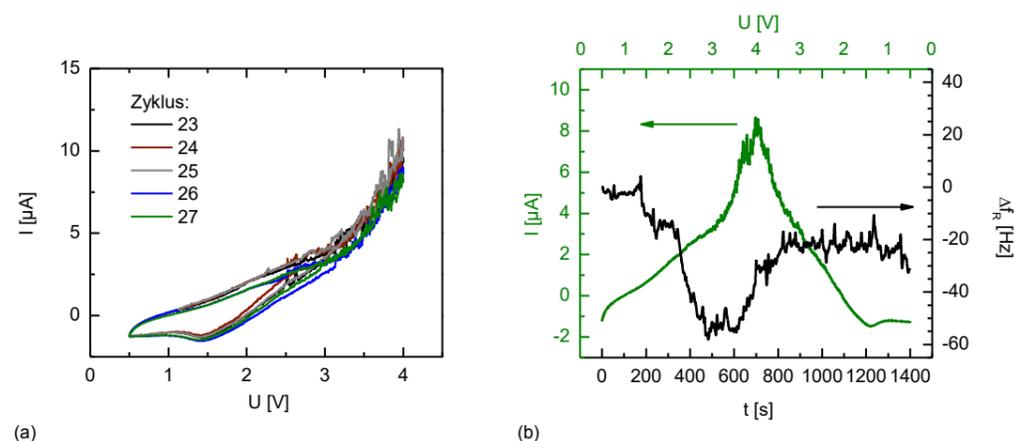


Abbildung 9: (a) Strom-Spannungs-Diagramm einer Dünnschicht-Lithium-Ionen-Batterie während des Ladens bzw. Entladens (Zyklen 23–27; Umgebungstemperatur: 50 °C); (b) Über der Zeit aufgetragene Stromantwort I der Batterie im 27. Zyklus mit zugehöriger Resonanzfrequenzänderung  $\Delta f_R$  des Temperatursensors

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

Da für die Auswertung der Messdaten möglichst genaue Kenntnisse zum thermischen Verhalten der piezoelektrischen 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 1000 °C bestimmt. Die genaue Kenntnis dieser Daten ist essentiell für eine genaue Auswertung der Dünnschichtkalorimetrie-Messungen.

#### 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 ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , 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 ( $p_{\text{O}_2}$ ) in 0,5 Prozent  $\text{H}_2/\text{Ar}$  wurde mit dem Dünnschichtkalorimeter von Raumtemperatur bis in den Hochtemperaturbereich (ca. 800 °C) untersucht (Abbildung 8). Während in Luft drei Phasenumwandlungen auftreten (bei 330 °C, 410 °C, 600 °C), kann man in 0,5 Prozent  $\text{H}_2/\text{Ar}$  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  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -Phase bei unterschiedlichen Temperaturen aus, in Luft deutlich früher als in 0,5 Prozent  $\text{H}_2/\text{Ar}$ . Auffällig ist, dass sich die monokline Schichtstruktur  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  lediglich unter Umgebungsluft ausbildet. In 0,5 Prozent  $\text{H}_2/\text{Ar}$  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 Materialstruktur und unterstützen die Optimierung der Materialsynthese.

#### In-situ-Dünnschichtkalorimetrie an Festkörper-Dünnschichtzellen

Das vorgestellte TFC-System eignet sich auch für die *In-situ*-Kalorimetrie an Festkörper-Dün-

## 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,  
hendrik.wulfmeier@efzn.de;  
M.Sc. Alexander Omelcenko,  
alexander.omelcenko@efzn.de

#### Internet:

www.spp1473.kit.edu/



Hendrik Wulfmeier

schichtbatterien während der gleichzeitigen elektrochemischen Zyklierung. In diesem Fall wird die Temperatur des Messsystems möglichst konstant gehalten. Zusätzlich zum Netzwerkanalysator wird ein Potentiostat angeschlossen. Soweit bekannt, ist die TFC das erste kalorimetrische System, mit dem die Beobachtung der Wärmeentwicklung einer Dünnschichtbatterie während der (De-)Lithierung realisiert wird. Abbildung 9 (a) zeigt beispielhaft ein Strom-Spannungs-Diagramm einer Dünnschicht-Lithium-Ionen-Batterie beim Laden bzw. Entladen im Bereich zwischen 0,5–4 V. Exemplarisch sind die Zyklen 23–27 dargestellt. Die Messungen finden bei einer konstanten Umgebungstemperatur von 50 °C statt. Die Dünnschichtzelle zeigt eine Stromantwort im  $\mu\text{A}$ -Bereich. In Abbildung 9 (b) ist der Verlauf der Stromantwort über der Zeit aufgetragen; zusätzlich ist der Frequenzverlauf des Temperatursensors angegeben wie er während der *InSitu*-Messung mittels Dünnschichtkalorimetrie ermittelt wird. Der Verlauf der Resonanzfrequenz spiegelt die Temperatur der Dünnschichtzelle im elektrochemischen Betrieb wider. Zu erkennen sind beispielsweise der Reaktionspeak mit korrelierendem Temperatursprung sowie die Entwicklung der Joule'schen Wärme während des weiteren Ladevorgangs.

#### Zugehörige Publikationen

Planare resonante Temperatursensoren für die Hochtemperatur-Dünnschichtkalorimetrie  
Alexander Omelcenko, Hendrik Wulfmeier, Holger Fritze  
Technisches Messen (eingereicht im Juli 2017)

Thin-film calorimetry: In-situ characterization of materials for lithium-ion batteries  
Alexander Omelcenko, Hendrik Wulfmeier, Daniel Albrecht, Wassima El Mofid, Svetlozar Ivanov, Andreas Bund, Holger Fritze  
International Journal of Materials Research (angenommen am 10. August 2017)

Thin-Film Calorimeter for High-Temperature Applications: Thermodynamic Characterization on Piezoelectric Langasite Temperature Sensors  
Alexander Omelcenko, Hendrik Wulfmeier, Holger Fritze  
Tagungsband AMA Konferenz 2017 – SENSOR + TEST 2017; DOI: 10.5162/sensor2017/D4.3

Thermal stability of materials for thin-film electrochemical cells investigated by thin-film

- calorimetry  
Hendrik Wulfmeier, Alexander Omelcenko, Daniel Albrecht, Detlev Klimm, Wassima El Mofid, Marc Strafela, Sven Ulrich, Andreas Bund, Holger Fritze  
MRS Advances, 1, 1043–1049 (2016); DOI: 10.1557/adv.2016.72
- Preparation and characterization of c-LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> thin films prepared by pulsed laser deposition for lithium-ion batteries  
Daniel Albrecht, Hendrik Wulfmeier, Holger Fritze  
Energy Technology, 4, 1–8 (2016); DOI: 10.1002/ente.201600117
- Langasite-type resonant sensors for harsh environments  
Yuriy Suhak, Michal Schulz, Hendrik Wulfmeier, Ward L. Johnson, Andrey Sotnikov, Hagen Schmidt, Steffen Ganschow, Detlev Klimm, Holger Fritze  
MRS Advances, 1, 1513–1518 (2016); DOI: 10.1557/adv.2016.109
- 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
- Kalorimetrisches Messsystem auf Basis planarer Temperatursensoren für die Untersuchung dünner Schichten im Hochtemperaturbereich  
Hendrik Wulfmeier, Daniel Albrecht, Holger Fritze, Svetlozar Ivanov, Andreas Bund
- Tagungsband 17. GMA/ITG Fachtagung Sensoren und Messsysteme, 1–6 (2014)
- 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 – 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

## High-efficiency photovoltaic devices

### 1. Introduction

Increasing realization of the importance of developing clean, renewable sources of energy combined with breakthroughs in the fabrication, understanding, and application of solid-state and soft-material nanostructures have, over the last decade, reignited both commercial and research interest in photovoltaic devices for solar energy conversion. Nanostructure-based photovoltaic devices have emerged as being of particular interest, both for large-area devices in which novel material structures and/or processing approaches enable very low manufacturing costs to be combined with moderate power conversion efficiency, and for very high efficiency devices for application in space-based or concentrator systems, for which maximization of power conversion efficiency is of paramount importance. For terrestrial applications such as concentrating photovoltaic (CPV) systems, high power conversion efficiency under a broad range of spectral illumination conditions is essential, as atmospheric scattering leads to very substantial variations in the spectral distribution of sunlight with time of day, time of year, location, and other variables. Furthermore, because solar cell areas in CPV systems are smaller than those for more conventional large-area systems by ~100–1000×, the development of materials and devices suitable for CPV applications aligns well with the NSF Sustainable Chemistry, Engineering, and Materials initiative by enabling renewable (solar) power generation with dramatically reduced materials usage compared to non-CPV systems.

In this project, we explored material issues relevant to the realization of device concepts which

offer outstanding potential for realization of high power conversion efficiency under the broad range of spectral conditions encountered in terrestrial settings. This involves the combination of advanced concepts for high-efficiency photovoltaic devices, focusing specifically on quantum-well solar cells and related devices, with thin-film light trapping – the use of sub-wavelength metal and dielectric structures integrated with a semiconductor structure to engineer the propagation of photons within a thin-film photovoltaic device. In quantum-well solar cells and related device concepts, e.g., intermediate-band cells, incorporation of quantum wells or other structures enabling absorption of long-wavelength photons improves utilization of the incident solar spectrum, and consequently increases photocurrent generation relative to a homojunction device with, ideally, minimal reduction in open-circuit voltage. However, the requirements for achieving full absorption of long-wavelength photons – most importantly, the need for a sufficiently thick multiple-quantum-well layer (~1µm or more in thickness) – are typically in conflict with those for efficient collection of photogenerated carriers, which generally requires a thin multiple-quantum-well layer (~0.2µm in thickness). We will exploit coherent light trapping techniques, in which incident photons are coupled into guided optical modes within a thin-film device to enable more complete absorption, to improve absorption efficiency in thin multiple-quantum-well layers required for photogenerated carrier collection. And we will investigate fundamental issues in epitaxial growth, processing, characterization, and carrier transport for III-V arsenide, antimonide, and dilute nitride semiconductors to realize new quantum-well solar cell designs that will enable substantial increases in current with minimal impact on operating voltage.

#### Projektpartner:

- University of Texas at Austin, USA

### 2. Results

Initially we focused on the growth of InAs structures including quantum dots and wells and investigated the segregation of In to optimize the structures for photovoltaic devices.<sup>A,B</sup> We then shifted focus on the investigation of light trapping in structures containing InAs quantum wells,<sup>C,E</sup> while starting initial experiments

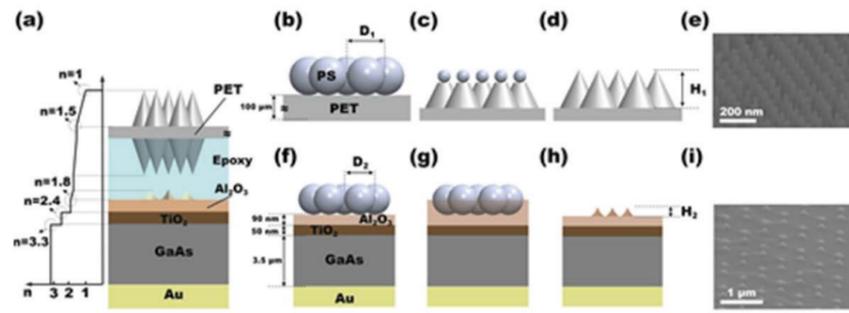


Figure 1: (a) Schematic diagram of a polymer-packaged GaAs solar cell coated with conventional  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  bilayer antireflection coating with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  "nanoislands" and integrated with double-side "moth-eye" textured PET packaging sheet by space-grade encapsulant, together with the refractive index profile. (b)-(d) Schematic diagram of process flow for fabricating "moth-eye" structure on PET substrate. (e) SEM image of the completed "moth-eye" structures on PET substrate. (f)-(h) Schematic diagram of process flow for fabricating  $\text{Al}_2\text{O}_3$  "nanoisland" structures on  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  bilayer antireflection coating. (i) SEM image of the completed "nanoisland" structure.

with the growth of advanced structures containing Sb and N. Finally, we explored the proposed path to include advanced metastructures for enhanced light trapping<sup>F1</sup>.

In III/V solar cells, photon absorption efficiency can be greatly reduced by Fresnel reflection due to optical impedance mismatch between the incident medium (air) and the semiconductor solar cell substrate. Thus, key to realization of high power conversion efficiencies is the minimization of Fresnel reflectance for photons impinging on the cell surface over the full range of incident conditions in which the solar cell is designed to operate. Conventional planar bilayer antireflection coatings, e.g.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , are able to maintain excellent antireflection performance under normal and small incident angles. However, under large incident angles, the antireflection performance of conventional  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  bilayer antireflection coatings tends to deteriorate dramatically, leading to much less efficient energy harvesting under such incident conditions. Furthermore, additional photon reflectance loss at the cell's polymer packaging layer, which can seriously degrade the solar cell's overall performance, has to be taken into account in many practical photovoltaic applications.

As a subpart of the project, we demonstrated and analyzed antireflection performance of single-junction GaAs solar cells with submicron "nanoisland" dielectric antireflection coatings fabricated through the previously described nanosphere lithography (NSL) process,

and integrated with polyethylene terephthalate (PET) packaging sheets with "moth-eye" structures fabricated using the NSL process. Measurements show that compared to cells with conventional  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  bilayer antireflection coatings, the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  "nanoislands"-integrated coating maintains comparable antireflection performance at normal and smaller incident angles, while significantly boosting the antireflection performance at large incident angles. Additionally, light trapping effects of the "nanoisland" dielectric structure have been analyzed in thin-film  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum well solar cells. Measurement results show that "nanoisland" structures not only provide excellent antireflection performance because of the resulting graded-index profile which provides good optical impedance matching between air and the cell substrate, but also by scattering light into guided modes inside the semiconductor layer, as demonstrated by increased long-wavelength absorption in the quantum well region.

Single-junction GaAs solar cells were grown by metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) on GaAs (001) n-type substrates, with a pin-region thickness of  $1\mu\text{m}$ . Pd/Ge and Cr/Au were used to define n and p-type contacts, respectively. Figure 1(a) shows schematic diagrams of the GaAs solar cell with conventional  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  bilayer antireflection coating integrated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  "nanoislands" and "moth-eye" textured PET packaging layer, along with the schematic refractive index profile. 200nm

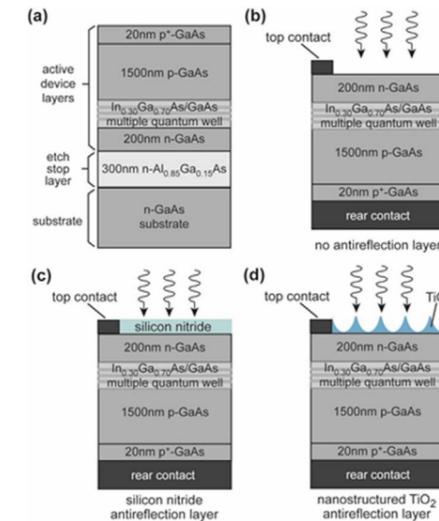


Figure 2: (a) Schematic diagram of epitaxial layer structures for  $\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum well solar cell structure. (b)-(d) Schematic diagrams of final quantum well solar cell device structures fabricated without antireflection layer (b), with silicon nitride thin-film antireflection coating (c), and nanostructured  $\text{TiO}_2$  antireflection layer (d).

diameter polystyrene spheres were deposited on the surface of PET sheet using NSL process through a Langmuir-Blodgett process, forming a hexagonal array soft mask for subsequent dry etching process as shown in Figure 1(b); subsequent reactive ion etching creates the "moth-eye" nanostructure on the PET surface, consisting of arrays of tapered cylindrical pillars of height  $\sim 400\text{nm}$  as shown in Figure 1(c)-(d); Figure 1(e) shows an SEM image of the completed "moth-eye" structure on a PET surface. 1000nm diameter polystyrene spheres were deposited directly on the  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  bilayer antireflection layer coated cell surface using NSL process; then 500nm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  was deposited by e-beam evaporation [Figure 1(g)], followed by a lift-off process in which sonication in toluene was performed to remove the polystyrene spheres, resulting in a hexagonal array of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  "nanoislands" of height  $\sim 150\text{nm}$ . Figure 1(i) shows an SEM image of the completed "nanoisland" structure on the cell surface.

Optical transmittance measurements of "moth-eye" textured PET sheets were performed using collimated light from a halogen lamp spectrally resolved by a monochromator based sys-

tem from Optronic Laboratories with AC lock in detection. The monochromatic light was linearly polarized by a Glan-Thompson polarizer before reaching the device. Devices were mounted on a rotating stage, allowing measurements to be performed at angles of  $0^\circ$  to  $75^\circ$  and at wavelengths ranging from 400nm to 1100nm. Space-grade encapsulant (Dow Corning 93-500) was used to attach the PET packaging layer to the GaAs cell surface. Photocurrent response spectra were measured at zero bias using the same monochromator system. The calculated  $J_{sc}$  for devices of each type under different incident angles was derived from E.Q.E. measurements weighted by the AM1.5G solar spectrum, given by:

$$J_{sc} = e \int EQE(\lambda) I_{AM1.5}(\lambda) d\lambda$$

where  $e$  is the electron charge magnitude, and  $I_{AM1.5}(\lambda)$  is the AM1.5G photon flux intensity.

For the study of light trapping performance of dielectric "nanoisland" structures, samples were grown by solid-source molecular beam epitaxy (MBE) on GaAs (001) n-type substrates with the structure shown schematically in Figure 2(a). A 300nm n-type ( $n \sim 2.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$  sacrificial etch stop layer was grown initially, followed by a 200nm n-type ( $n \sim 2.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) GaAs layer, followed by the growth of an intrinsic layer consisting of three 4nm  $\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$  quantum wells separated by 17nm GaAs barriers with 21nm undoped GaAs layers immediately above and below the quantum well region. Finally, a 1500nm p-type (Be-doped,  $p \sim 5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) GaAs layer and a 20nm p+ ( $p \sim 5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) GaAs contact layer completed each epitaxial layer structure, with the growth temperature kept above  $500^\circ\text{C}$  throughout.

Figure 2(a) shows a schematic diagram of the process flow for fabricating thin-film  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}$  quantum well solar cells bonded onto silicon substrates. 10nm Cr/100nm Au/1200nm In metallization was deposited on the p+ GaAs surface through e-beam evaporation, followed by the epitaxial wafer directly bonded onto a silicon substrate deposited with 10nm Cr/800nm Au, with the GaAs growth substrate removed by chemical etching in  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$  (1:19) followed by 50% citric acid: $\text{H}_2\text{O}_2$  (4:1). Then, 10% dilute HF was used to remove the  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$  etch-stop layer, and  $1\text{mm} \times 1\text{mm}$  and  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$  device mesas were defined by photolithography process followed by wet etching in  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2$  (1:19). 76nm silicon nitride

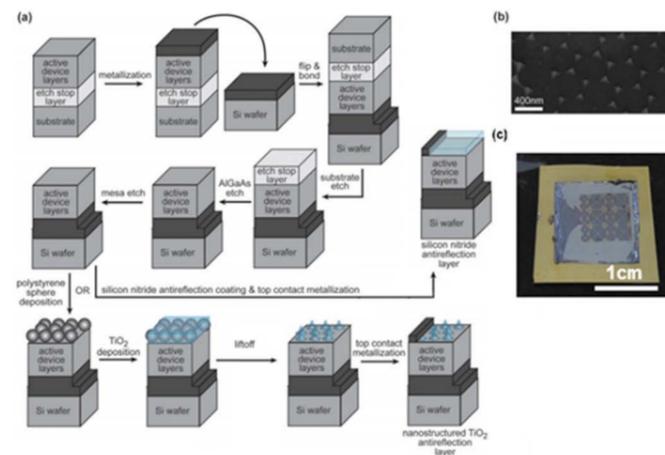


Figure 3: (a) Key steps in process flow for fabrication of solar cell devices with either silicon nitride thin-film antireflection coating or nanostructured TiO<sub>2</sub> antireflection layer, the latter using NSL process for patterning. (b) Scanning electron micrograph of nanostructured TiO<sub>2</sub> antireflection layer on GaAs surface. (c) Layer-transferred thin-film quantum well cell on silicon substrate.

was deposited through e-beam evaporation on the control cell surface as a conventional single-layer antireflection coating; then deposition and patterning of 25nm AuGe/10nm Ni/100nm Au n-type Ohmic contact metallization completed the fabrication process. 500nm polystyrene spheres were first deposited on cell surface using NSL process for devices with a nanostructured TiO<sub>2</sub> antireflection coating, forming a hexagonal array mask for subsequent processing. Then, a 250nm TiO<sub>2</sub> layer was deposited by e-beam evaporation, followed by a lift-off process in toluene to remove the polystyrene spheres, and then the same n-type Ohmic contact metallization process as described above. Figure 2(b) shows scanning electron micrographs of the resulting TiO<sub>2</sub> structures formed on the GaAs surface, and Figure 2(c) a photo of the fabricated devices.

Figure 3(a) shows schematic diagrams of the GaAs control cell with conventional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> bilayer antireflection coating and the cell with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> “nanoisland” structures deposited on the bilayer antireflection coating surface. Because the conventional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> bilayer antireflection coating is already optimized for reducing Fresnel reflection at normal or small incident angles, similar performance is observed for each type of coating at smaller incident angles. On the other hand, at large incident angles of ~60°-80°, the cell with nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating exhibits substantially improved anti-reflection characteristics compared to the cell

with only conventional Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> antireflection coating thanks to better optical impedance matching between the incident medium (air) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures.

We have demonstrated in this project that the efficiency in the infrared absorption region of III-V solar cells based on InAs quantum dots/wells can be optimized by nanoscale scattering structures based on nanoparticles/structures or metamaterials. However, these devices still suffer from reduced open threshold voltage due to lowered bandgap of the InAs quantum wells. Initial ideas were, including growth of advanced Sb-containing structures, were explored both theoretically as well as experimentally. We noticed during the course of the project, that these advanced structures still require extensive optimization on the side of the layer layout, for which we started recently more simulation work. In a follow-up project we would like to explore better structure layouts that prevent In segregation through insertion of Al layer, lower carrier escape and better photon absorption through optimized bandgap engineering using Sb containing layers. The basis for growth of such structures was established in our lab, however complete designs have not been fabricated due the required simulation work. In addition, we started work on metamaterial structures and would like to explore these concepts, including irregularly shaped planar digital metastructures based on polymer layers, as an alternative to the regular shaped structures explored in thin proj-

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**  
Materials World Network:  
Development of high-efficiency photovoltaic devices for optimal performance under a broad range of spectral illumination conditions

**Fördernde Stelle:**  
Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

**Förderkennzeichen:**  
SCHA 1576/3-1

**Projektlaufzeit:**  
01.02.2014 – 31.01.2017

**Verantw. Projektleiter:**  
Prof. Dr. Daniel Schaadt

ect. For this, III-V solar cells shall serve as a model systems where absorption can be optimized in the visible as well as in the infra-red region. Later the concepts can be applied to other kinds of solar cells with lower production costs.

### 3. Publications

- 1) C. J. Mayer, M. F. Helfrich, and D. M. Schaadt, “Influence of hole shape/size on the growth of site-selective quantum dots”, *Nanoscale Res. Lett.* 8, 504 (2013)
- 2) Thorsten Mehrrens, Knut Müller, Marco Schowalter, Dongzhi Hu, Daniel M Schaadt, Andreas Rosenauer, “Measurement of indium concentration profiles and segregation efficiencies from high-angle annular dark field-scanning transmission electron microscopy images”, *Ultramicroscopy* 131, 1 (2013)
- 3) X. H. Li, P. C. Li, D. Z. Hu, D. M. Schaadt, and E. T. Yu, “Light trapping in thin-film solar cells via scattering by nanostructured antireflection coatings”, *J. Appl. Phys.* 114, 044310 (2013)
- 4) X. H. Li, P. C. Li, D. Z. Hu, D. M. Schaadt, and E. T. Yu, “Angular dependence of light trapping in In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs quantum-well solar cells”, *J. Appl. Phys.* 115, 044303 (2014)
- 5) X. H. Li, P. C. Li, D. Z. Hu, D. M. Schaadt, Ch. Stender, C. O. McPheeters, R. Tatavarti, K. Sablon, and E. T. Yu, “Integrated optical nanostructures for wide-angle antireflection and light trapping in III/V solar cells”, *Photovoltaic Specialist Conference* 40, 2238 (2014)

- 1) J. Q. Xi, M. F. Schubert, J. K. Kim, E. F. Schubert, M. Chen, S. -Y. Lin, W. Liu, and J. A. Smart, “Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection,” *Nature Photonics*, 2007, vol. 1, pp. 176-179
- 2) D. R. G. Mitchell, G. Triani, D. F. Attard, K. S. Finnie, P. J. Evans, C. J. Barbe, and J. R. Bartlett, “Atomic layer deposition of TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film and nanolaminates,” *Smart Materials and Structures*, 2006, vol. 15, S57
- 3) X. H. Li, P. C. Li, D. Z. Hu, D. Schaadt, and E. T. Yu, “Light trapping in thin-film solar cells via scattering by nanostructured antireflection coatings,” *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114, 044310
- 4) J. Rybczynski, U. Ebels, and M. Giersig, “Large-scale, 2D arrays of magnetic nanoparticles,” *Colloids and Surfaces A*, 2003, vol. 1, p. 219
- 5) X. H. Li, P. C. Li, D. Z. Hu, D. Schaadt, and E. T. Yu, “Angular dependence of light trapping in In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/GaAs quantum-well solar cells,” *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 115, 044303

## PHOTOBIOSENSE: Dual getriebener photonischer Sensor zur Überwachung von Biogasanlagen

Teilvorhaben:

Dual getriebener photoakustischer Gassensor (DuphGas)

### Motivation

Die Biogaserzeugung ist ein wichtiger Bestandteil bei der Bereitstellung regenerativer Energie. Neben den Hauptbestandteilen Methan und Kohlendioxid enthält Biogas auch Verunreinigungen wie Ammoniak und Schwefelwasserstoff. Diese Bestandteile sind hochkorrosiv und müssen bei Überschreitung gewisser Konzentrationen vor Nutzung des Gases zur Direktverstromung oder vor Einspeisung in das Gasnetz entfernt werden. Die Bereitstellung kontinuierlich messender Verfahren würde nicht nur eine Überwachung der Anlage und eine vereinfachte Wartung ermöglichen, sondern bietet durch Bestimmung der Konzentration bestimmter Zwischenprodukte im Fermenter auch das Potential, ein tieferes Verständnis über den Fermentationsprozess zu gewinnen und aktiv in diesen einzugreifen. Die damit einhergehende effizientere Nutzung bestehender Anlagen würde die Attraktivität der Biogaserzeugung noch steigern.

### Stand der Technik

Üblicherweise werden bei der Biogasanalyse die Messgrößen Methan ( $\text{CH}_4$ ), Sauerstoff ( $\text{O}_2$ )

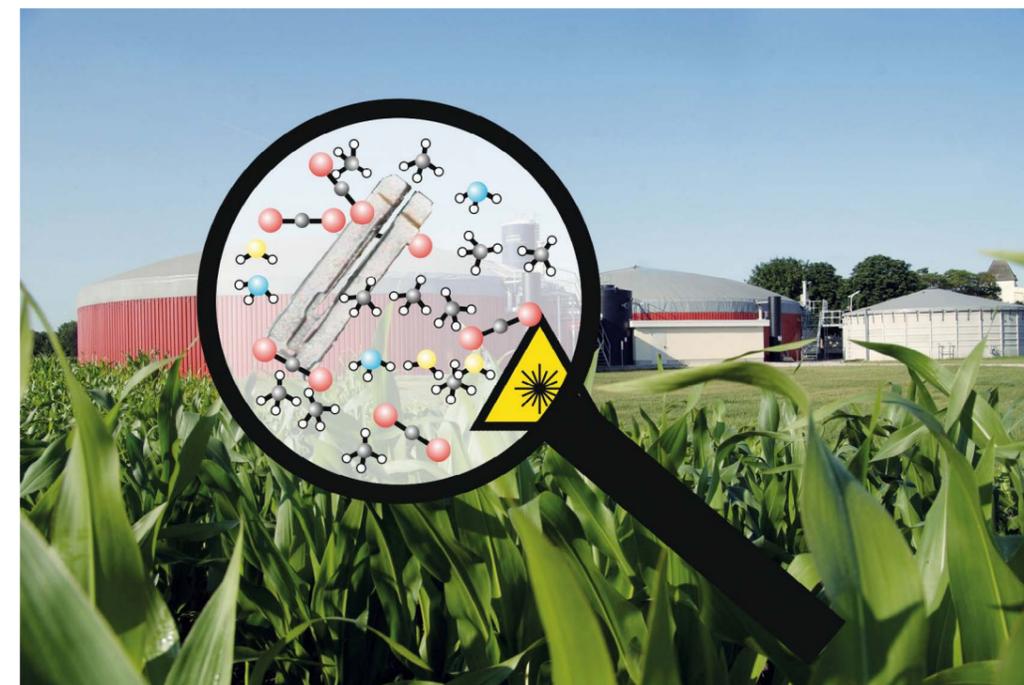
und Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) gemessen, in manchen Fällen auch Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). In Sonderfällen, zur Zeit meist bei Versuchsanlagen, können auch noch andere Gase von Interesse sein.

Die Methan- und Kohlendioxid-Gehalte im Biogas liegen in der Regel um 50 Vol.-Prozent. Ziel ist die Überwachung des Biogas-Prozesses und die Einhaltung optimaler Bedingungen für den nachgeschalteten Gasmotor oder die anschließende Gasaufbereitung.

Da im Biogas-Prozess bei der Methan- und Kohlendioxid-Bildung Luftsauerstoff umgesetzt wird, kann die Messung des Restsauerstoffes ebenfalls zur Prozessüberwachung genutzt werden. Bei  $\text{O}_2$ -Eindüsung dient die Messung auch zur Kontrolle der Entschwefelung. Der Restsauerstoffgehalt muss schon aus Gründen des Explosionsschutzes deutlich unter drei Vol.-Prozent liegen. Das Biogas kann unter ungünstigen Umständen Schwefelwasserstoff in Konzentrationen von bis zu einigen tausend ppm aufweisen. Da es schwere Schäden an Gasmotoren erzeugen kann, ist die Konzentrationsüberwachung bei Biogas-Prozessen von besonderer Bedeutung, um rechtzeitig geeignete Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Durch Fortschritte in der Steuerung des Biogasprozesses ist es in den letzten Jahren gelungen, den  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalt im Rohgas deutlich zu vermindern. Insbesondere in der Anfahrphase können Spitzenwerte von mehreren 1000 ppm meist wirkungsvoll verhindert werden. So finden in manchen Fällen Messwertgeber mit einem Messbereich von 100 bis 200 ppm Verwendung. Trotzdem bleibt aber die Gefahr einer Sensorüberlast bei außergewöhnlichen Betriebszuständen. Aufgrund dieser Verbesserungen ist der Einsatz von Aktivkohlefiltern möglich, die eine nahezu vollständige Entfernung des Rest- $\text{H}_2\text{S}$  erlauben. Dieser zusätzliche Schutz ist bei Gasmotoren mit Abgasreini-

### Verbundpartner:

- ExTox Gasmess-Systeme GmbH
- Fraunhofer IAF
- PicoLas GmbH
- Sacher Lasertechnik GmbH
- Sensor Photonics GmbH
- Knestel Technologie und Elektronik GmbH
- Deutsches Biomasseforschungszentrum DBFZ gGmbH
- TU Clausthal



gung notwendig. Solche Systeme verhindern Formaldehyd-Emissionen und der eingespeiste Strom wird höher vergütet. Da bereits geringe  $\text{H}_2\text{S}$ -Konzentrationen zu einer Schädigung des Katalysators führen und die Aufnahmefähigkeit des Filtermaterials begrenzt ist, muss ein Durchbruch rechtzeitig erkannt werden. Es wird deshalb häufig eine zweite  $\text{H}_2\text{S}$ -Messung hinter dem Aktivkohlefilter vorgenommen. Hierbei ist eine zuverlässige Messung mit Alarmschwellen zwischen 5 und 10 ppm gefordert.

Im Bereich der Biogaseinspeisung sind zwei verschiedene Messaufgaben zu unterscheiden: Zum einen muss die Gaszusammensetzung mit einer eichfähigen Messung überwacht werden. Dafür wird in der Regel ein Prozess-Gaschromatograph eingesetzt, dessen Messung jedoch nur zyklisch erfolgen kann. Die Kosten für Anschaffung und Unterhaltung sind sehr hoch. Deshalb wird zum anderen häufig eine zweite, kontinuierliche Messung parallel betrieben. Da der  $\text{CO}_2$ -Anteil im Biogas vor der Einspeisung entfernt wird, liegt der  $\text{CH}_4$ -Anteil in der Regel deutlich über 90 Prozent. Aufgrund der nicht-linearen Charakteristik des zumeist eingesetzten IR-Absorptionsverfahrens verschärfen sich die Anforderungen an die Messtechnik gegenüber Rohbiogas. Die  $\text{O}_2$ -Messung kann in der Regel unverändert übernommen werden. Der Messbereich für und Anforderungen an die  $\text{H}_2\text{S}$ -Messung entsprechen etwa dem Profil für die Messung hinter Aktivkohlefiltern von Bio-

gasanlagen. Insbesondere in Versuchsanlagen werden weitere Spurengase quantifiziert und ihr Einfluss auf den Zustand des Biogasprozesses untersucht. Häufig werden dabei die Gase  $\text{H}_2$  und  $\text{NH}_3$  genannt, wobei allerdings immer zu prüfen ist, ob der erhaltene Messwert eine Aussage über die Gegebenheiten im Fermenter zulässt. Auch die Messung kurzketziger Säuren, die mit der Flüssigphase im Gleichgewicht stehen, könnte zukünftig als Zustandsparameter für den Prozess wichtig werden. Derzeit werden folgende Sensoren in Biogasanlagen eingesetzt:

- Elektrochemische Sensoren werden vor allem zur Messung von Wasserstoff, Ammoniak und Sauerstoff eingesetzt. Es wird häufig eine Messgasaufbereitung benötigt und Querempfindlichkeiten (zum Beispiel  $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ ) und vorzeitige Alterung (zum Beispiel  $\text{O}_2$ -Sensoren durch Kohlendioxid), das heißt geringere Standzeiten müssen berücksichtigt werden.
- Weiterhin finden Wärmeleitfähigkeitsmessungen in der Gasmesstechnik Einsatz. Allerdings besteht der prinzipielle Nachteil, dass sich die Wärmeleitfähigkeit eines Gases bei Beimengung jeglicher anderer Komponenten ändert. Beim Biogas kommt erschwerend hinzu, dass die beiden Hauptkomponenten  $\text{CH}_4$  und  $\text{CO}_2$  entgegengesetzte Signale erzeugen. Befriedigende Messwerte ergeben sich nur bei Einsatz eines speziellen Messzyklus und anschließender interner Verrechnung. Die Messabweichungen sind

in der Praxis mit  $\pm 2\text{--}4$  Vol.-Prozent anzusetzen.

- Gaschromatographen werden in Biogasanlagen eingesetzt, wenn eichfähige Prüfverfahren bei der Einspeisung benötigt werden. Allerdings können sie nur in Messzyklen und nicht kontinuierlich eingesetzt werden und sind in der Anschaffung sehr kostenintensiv.
- Die nichtdispersive Infrarotanalyse wird heute meist bei kontinuierlichen Messungen eingesetzt. Je nach Schmalbandigkeit der verwendeten Filter können Störeinflüsse durch die jeweils anderen im Biogas enthaltenen Gaskomponenten vermieden werden. Die erzielbare Messgenauigkeit liegt bei  $\pm 1$  Vol.-Prozent. Ein weiterer Vorteil ist die lange Lebensdauer. Nichtlinearität und Probleme durch Sättigung bei hohen Konzentrationen schränken jedoch den dynamischen Bereich ein. Ein schmalbandiger Filter mindert die Eingangsentensität, was zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis führt, das heißt hier muss ein Kompromiss zwischen Selektivität und Sensitivität gefunden werden.

Der hier verfolgte alternative Lösungsansatz zur Multikomponentenanalyse in Biogasanlagen basiert auf schmalbandigen MIR-Laserquellen (weit durchstimmbarer EC-QCL und diskret auf gewählten Linien emittierender Multi-DFB-ICL) und neuartigen photoakustischen Messverfahren. Im Gegensatz zur oben genannten nichtdispersiven IR-Analyse, werden direkt einzelne Absorptionslinien adressiert und somit eine sehr hohe Selektivität erreicht.

### Forschungsgegenstand

Ziel des Teilvorhabens DuphGas ist die Erarbeitung neuer Modulationstechniken für die photoakustische Spektroskopie (PAS). Im Gegensatz zur konventionellen PAS werden zwei unterschiedliche Anregemechanismen genutzt, was möglich ist, weil eine Quarz-Mikrostimmgabel als Signalwandler verwendet wird, die nicht nur über eine akustische Welle zum Schwingen angeregt werden kann, sondern auch über ihre piezoelektrischen Eigenschaften elektrisch getrieben werden kann. Dies ermöglicht das gleichzeitige oder alternierende Treiben der Stimmgabel, was zur Lösung von prinzipiellen Problemen bei der PAS eingesetzt werden kann: Bei der PAS beeinflusst das Hintergrundgas die Signalamplitude, da die effektive Umwandlung absorbierter Energie in Translationsmoden von den vorliegenden Stoßpartnern abhängt (Relaxationsdynamik).

## Daten zum Projekt

### Vorhabenbezeichnung:

Dual getriebener photonischer Sensor zur Überwachung von Biogasanlagen

### Fördernde Stelle:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

### Förderkennzeichen:

13N13826

### Projektlaufzeit:

01.01.2016 – 31.12.2018

### Projektleiterin:

Dr. Ulrike Willer

Die Schallgeschwindigkeit hängt von dem Gasgemisch ab, in dem sich die Welle ausbreitet, das heißt starke Änderungen der Zusammensetzung resultieren in einer Veränderung der Resonanzeigenschaften des akustischen Resonators.

Bei QEPAS (Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy) ändern sich ebenfalls die Dämpfungseigenschaften des die Stimmgabel umgebenden Gases, so dass das Hintergrundgasgemisch Einfluss auf die Güte und damit auf die Signalamplitude hat; weiterhin ergibt sich eine Verschiebung der Resonanzfrequenz, so dass nicht sichergestellt ist, dass mit der optimalen Modulationsfrequenz angeregt wird. Ist dies nicht der Fall, vermindert sich die Signalamplitude, was dann zu einer fälschlicherweise geringeren Konzentrationsangabe führt.

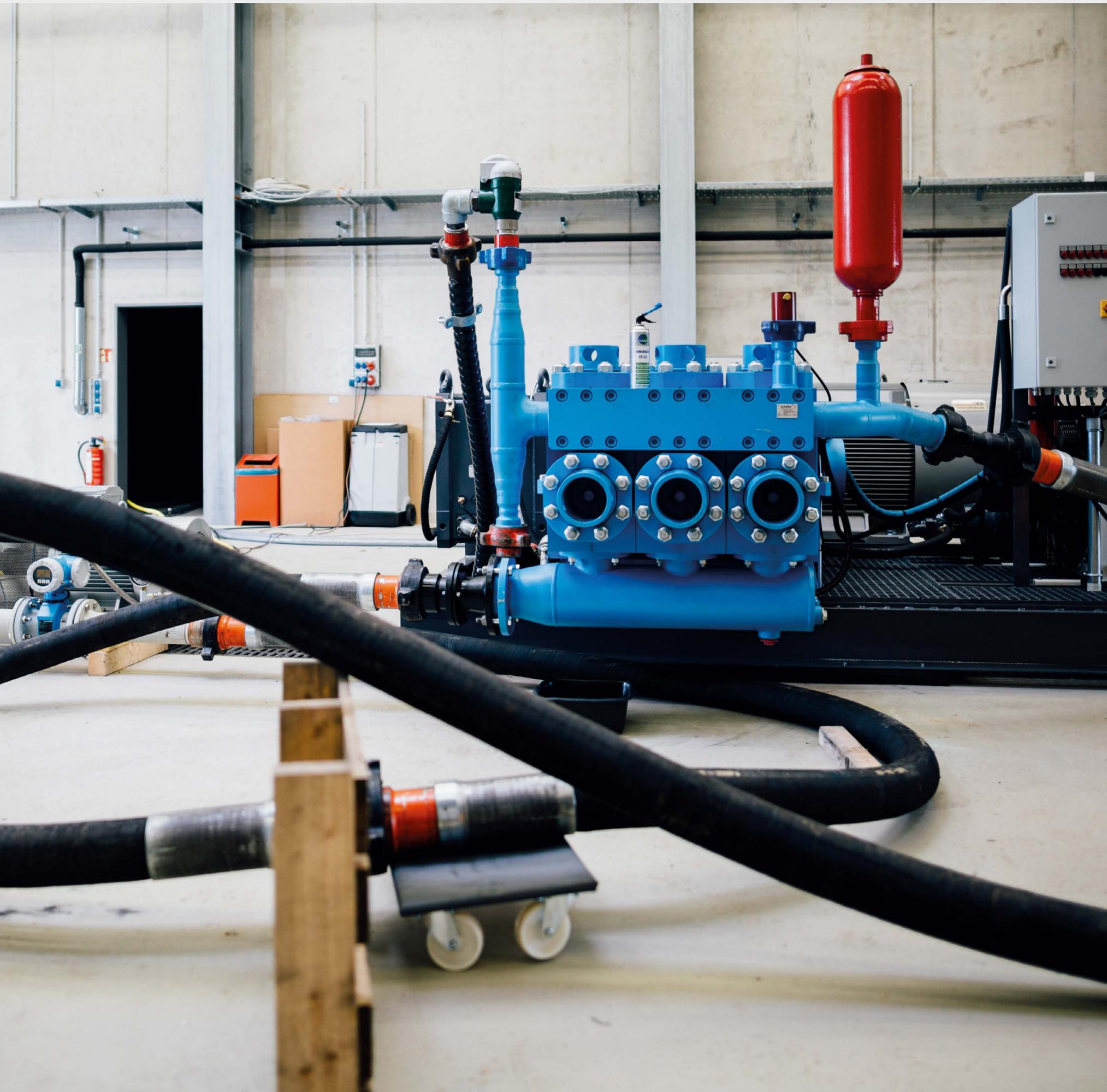
Aus diesen Gründen wird PAS meist nur dann angewendet, wenn Spurengase vor einem relativ konstanten, gut charakterisierten Hintergrundgas gemessen werden sollen.

In diesem Projekt werden die neuartigen Modulationsmethoden genutzt, um Informationen über die Relaxationsdynamik und somit über

das Hintergrundgasgemisch zu extrahieren. Die Verwendung eines Schwingkreises ermöglicht eine Anregung bei der jeweiligen Resonanzfrequenz, so dass zum einen immer ein Signaloptimum erreicht wird, zum anderen aber auch Informationen über das Umgebungsgas gewonnen werden können, da die jeweilig nötige Frequenz ausgelesen werden kann.

Es werden Auswerterroutinen erarbeitet, welche die zusätzlich vorliegenden Parameter dazu nutzen, den Anwendungsbereich der photoakustischen Spektroskopie auch in den Bereich hoher Konzentrationen auszudehnen und den prinzipiell vorliegenden hohen Dynamikbereich der Messmethode auszunutzen.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde ein Laboraufbau realisiert, an dem experimentell der Einfluss von unterschiedlichen Gasgemischen auf Signalamplituden, Phasenlage zwischen akustischer und elektrischer Anregung und Abklingzeiten untersucht wird. Weiterhin werden die Relaxationspfade und zugehörigen Relaxationszeiten theoretisch erarbeitet und die erwarteten Änderungen in der Verfügbarkeit der eingetragenen Energie mit den experimentellen Resultaten verglichen, um ein tieferes Verständnis der Relaxationsdynamik zu erlangen.



## AUSGEWÄHLTE BEITRÄGE ZUM WISSENSTRANSFER

# 4.

## Energieszenarien Niedersachsen 2050 – Runder Tisch Energiewende Niedersachsen

### Hintergrund

Erneuerbare Energiequellen sind eine systemrelevante Größe im Energiesystem. Im Jahr 2014 betrug der Anteil erneuerbarer Energien mehr als 25 Prozent der deutschen Bruttostromerzeugung. Niedersachsen nimmt im Bundesvergleich eine Vorreiterrolle ein und liefert den größten Beitrag an EEG-vergütetem Strom. Neben der reinen Lieferung von elektrischer Energie werden die Anlagen zur Wandlung erneuerbarer Energien zukünftig auch Aufgaben der Systemführung und -stabilisierung übernehmen, wenn die bestehenden konventionellen Großkraftwerke, insbesondere Kern- und Kohlekraftwerke, schrittweise abgeschaltet werden.

Dieser Strukturwandel betrifft aktuell insbesondere das elektrische Energiesystem. Die Energiewende ist derzeit also weitestgehend auf dem Stromsektor fokussiert. Der Anteil des Stromsektors am Endenergieverbrauch in Deutschland beträgt allerdings weniger als ein Viertel; wengleich er für circa 40 Prozent

der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich ist. Die Sektoren Wärme und Kraftstoffe verbrauchen die übrige Endenergie. Der Klimawandel erfordert jedoch langfristig eine vollständige fossile Dekarbonisierung der gesamten Energieversorgung.

Vor diesem Hintergrund hat das Konsortium, bestehend aus dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, dem Institut für Umweltplanung der Leibniz Universität Hannover und der Ostfalia Hochschule unter Leitung des CUTEC Instituts die „Energieszenarien Niedersachsen 2050“ im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz erstellt. Das Gutachten dient als Basis der Arbeit des „Runden Tisches Energiewende Niedersachsen“, der im Mai 2015 seine Arbeit aufgenommen hat. Zu den Mitgliedern des auf Initiative des niedersächsischen Umweltministers Stefan Wenzel einberufenen Gremiums zählen 50 Persönlichkeiten aus der niedersächsischen Wirtschaft und Energiewirtschaft, aus Wissenschaft, Gewerkschaften, Kirchen, Kammern, Umwelt und Fachverbänden.



Abbildung 1: Vorstellung erster Ergebnisse des Gutachtens in der Auftaktsitzung des Runden Tisches Energiewende am 07. Mai 2015 (von links: Niedersächsischer Umweltminister Stefan Wenzel, Moderator Jörg Kuhbier, Prof. Hans-Peter Beck, Prof. Martin Faulstich)

Gegenstand dieses Gutachtens [1] ist einerseits die Entwicklung eines Szenarios mit einer zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energiequellen basierenden Energieversorgung mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Energiebereitstellung für die Verbraucher unter Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit. Aufbauend auf dieses Szenario wird andererseits ein zweites Szenario unter der Randbedingung einer im Vergleich zum Bezugsjahr 1990 um 80 Prozent verminderten Treibhausgasemission entwickelt.

Dabei wird zunächst jeweils ein konsistentes Ziel beschrieben, das einen technisch machbaren Zustand des Energieverbrauchs und der Energiebereitstellung im Jahr 2050 darstellt. Durch Stützstellen in Zehnjahresintervallen ergeben sich Zwischenziele für die kommenden Jahre (2020, 2030, 2040) auf dem Weg zum Zielzustand 2050. Diese Methode (Backcasting) steht damit im Gegensatz zu anderen Szenario-Methoden, die eine Fortschreibung des gegenwärtigen Trends in Richtung zunehmender Anteile regenerativer Energien in Form von Prognosen verfolgen. Aus der Sicht der Gutachter ist das Backcasting vorteilhaft, um kontraproduktive Entwicklungen und Verzögerungen zu vermeiden.

Die den vorgestellten Szenarien zugrunde liegenden Ansätze erreichen eine Deckung des

zukünftigen Energieverbrauchs mit verschiedenen erneuerbaren Energien. Es werden neben dem klassischen Stromsektor auch die Bereiche Wärme, Kraft- und Grundstoffe in den Verbrauchssektoren Haushalte, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Industrie und Verkehr berücksichtigt und auf regenerative Energien umgestellt.

Die Annahmen zur Energieerzeugung werden im Rahmen der Potenziale Niedersachsens getroffen. Dies erfolgt aufgrund der mit der jeweiligen Technologie korrespondierenden Flächenbedarfe unter Berücksichtigung möglicher Nutzungskonkurrenzen. Somit ist sichergestellt, dass die für 2050 berechneten Energiemengen auch tatsächlich technisch realisierbar und miteinander kombinierbar sind. Diese flächenbasierte Betrachtung wird für alle Technologien konsequent durchgeführt. Die beiden auf diese Weise erstellten Basisszenarien bilden die Grundlage für eine Reihe möglicher Szenariovarianten, die eine Identifikation wünschenswerter Konstellationen innerhalb des „Möglichkeitsraumes“ erlauben.

Der zu deckende Energieverbrauch errechnet sich aus dem Pro-Kopf-Energieverbrauch Deutschlands multipliziert mit der künftigen Einwohnerzahl von 9,5 Millionen. Diese Einwohnerzahl ergibt sich aus der Fläche Niedersachsens und der durchschnittlichen Bevölke-

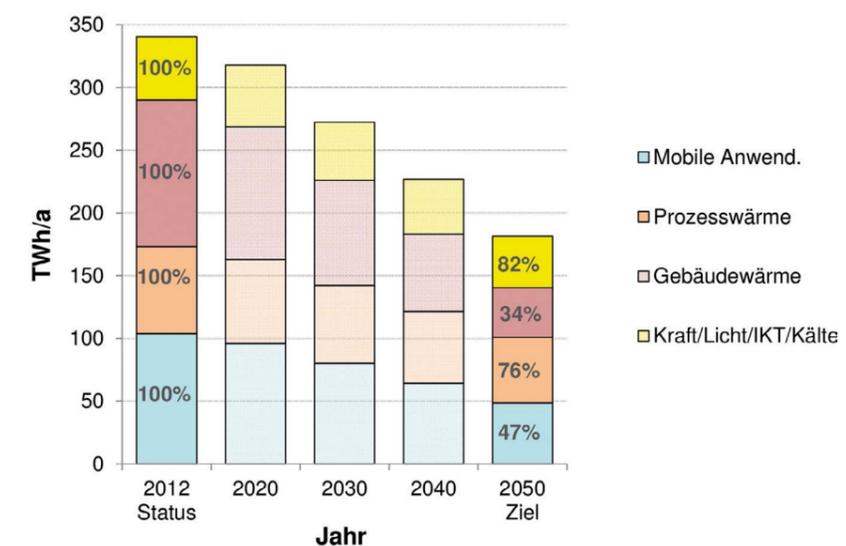


Abbildung 2: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen. Stützjahre linear interpoliert

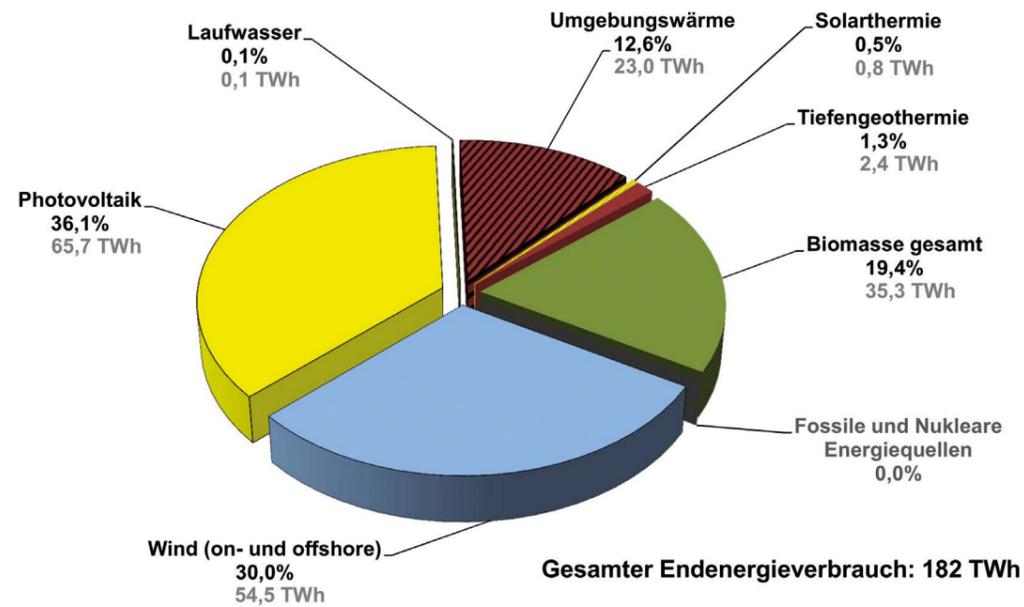


Abbildung 3: Endenergieverbrauch in 2050 nach Energiequellen

rungsdichte Deutschlands im Jahr 2050. Das sogenannte Solidarprinzip berücksichtigt, dass ein Flächenland wie Niedersachsen zukünftig regenerativ erzeugte Energie in Ballungsräume exportieren wird, die nicht zur Landesfläche Niedersachsens gehören (Solidarregion Niedersachsen).

### Ergebnisse Hauptgutachten

Unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Entwicklung, der Bevölkerungsentwicklung, der nutzbaren Effizienzpotenziale und einer Umstellung des treibstoffbasierten Verkehrs auf Elektromobilität, um einige wesentliche Eingangsgrößen zu nennen, wird im Szenario für das Zieljahr 2050 ein gegenüber heute um 47 Prozent geringerer Endenergieverbrauch zugrunde gelegt (Abbildung 2).

Mit 36 Prozent liefert der Solarstrom den größten Anteil auf Basis einer installierten Leistung von 92 GW für die Selbstversorgung Niedersachsens (zuzüglich 36 GW für den Export gemäß Solidaransatz) im 100 Prozent Erneuerbare Energien-Szenario. Den zweitgrößten Beitrag liefert die Windenergie mit 30 Prozent des zu deckenden Endenergieverbrauchs. Dabei wird eine onshore installierte Leistung von 20 GW für die Selbstversorgung Niedersachsens (zuzüglich 7 GW für den Export gemäß Solida-

ransatz) an Land im Jahr 2050 vorausgesetzt. Darüber hinaus werden gemäß des Solidaransatzes rund 13 Prozent der in Deutschland offshore aus Wind erzeugten Energie für die Solidarregion Niedersachsen genutzt. Für ganz Deutschland wird dabei eine installierte Leistung von 54 GW offshore berücksichtigt (davon 5 GW für die Selbstversorgung Niedersachsens zuzüglich 2 GW nach dem Solidaransatz). Den drittgrößten Beitrag mit rund 19 Prozent Deckungsanteil am Endenergieverbrauch liefert die Biomasse. Als speicherbarer Energieträger mit hoher Energiedichte kommt ihr zur Substitution fossiler Brennstoffe und als Kohlenstoffquelle zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff eine hohe Bedeutung zu. Weitere Anteile zur Deckung des Energieverbrauchs liefern die mit Wärmepumpen gewonnene Umgebungswärme sowie Tiefengeothermie und Wasserkraft. Wesentlich ist die Speicherung von Solar- und Windstrom in Form von Wasserstoff, der einerseits durch Rückverstromung zur Bedarfsdeckung in Phasen mit niedrigem Stromangebot und andererseits für die stoffliche Weiterverarbeitung genutzt werden kann.

Zur Erzeugung der erforderlichen Energie auf der Fläche Niedersachsens werden 1,5 Prozent der Bodenfläche (zuzüglich 0,6 Prozent der Bodenfläche für den Export gemäß Solida-

ansatz) für Onshore-Windparks benötigt. Für Solarfreiflächen sind 3,2 Prozent der Landwirtschaftsflächen (zuzüglich 1,3 Prozent der Landwirtschaftsflächen für den Export gemäß Solidaransatz) und für Solardachflächen 5 Prozent der Siedlungsflächen (zuzüglich 2 Prozent der Siedlungsflächen für den Export gemäß Solidaransatz) in Niedersachsen notwendig. Für Energiepflanzenanbau (Biogas, Biokraftstoffe, feste Biomasse) sind 7,9 Prozent der Landwirtschaftsfläche Niedersachsens zur Selbstversorgung und weitere 3,0 Prozent zum Export gemäß Solidaransatz vorgesehen.

Als Ausgangspunkt für die Erstellung eines zweiten Szenarios vor dem Hintergrund einer Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG) um 80 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 erfolgt eine Berechnung der energetischen und nichtenergetischen Treibhausgasemissionen für das Bezugsjahr 1990 und das Zieljahr 2050. Das im Zieljahr noch zulässige Kontingent an energetischen Emissionen von 16,139 Millionen t CO<sub>2</sub>-Äq/a bildet die Grundlage für die Erstellung des „Niedersachsen -80 % THG“ Szenarios. Die damit noch mögliche Nutzung fossiler Energieträger erfolgt primär in den Bereichen Grundstoffe für stoffliche Nutzung, Kraftstoffe und Prozesswärme.

Die Energieszenarien berücksichtigen die Diskussionen am Runden Tisch und die daraufhin formulierten Stellungnahmen der Mitglieder. Einerseits sind die Eingangsparameter auf Basis dieser Rückmeldungen modifiziert worden, andererseits wurden die vorgeschlagenen Änderungen in Form von Sensitivitätsanalysen untersucht, die ebenfalls Bestandteil dieses Gutachtens sind.

### Abschätzung Strombereitstellungskosten

In Hinblick auf die ökonomischen Fragestellungen, die sich bei der Umstellung des Energieversorgungssystems ergeben, erfolgt anschließend eine Abschätzung der Strombereitstellungskosten für die Zielszenarien. Diese umfassen Stromgestehungskosten sowie zusätzliche Netz- und Speicherkosten. Für das vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende Szenario resultieren unter den angenommenen Randbedingungen Strombereitstellungskosten von 11,6 Cent/kWh im Jahr 2050. Für das Szenario mit einer um 80 Prozent gegenüber 1990 reduzierten Treibhausgasemission belaufen sich diese Strombereitstellungskosten im Mittel auf 11,7 Cent/kWh.

Diese Ergebnisse werden in Bezug zu den Strombereitstellungskosten von 11,3 bis 18,1 Cent/kWh gesetzt, die sich ergeben würden, falls die zukünftige Stromversorgung weiterhin zum größeren Teil auf fossilen Energieträgern beruhen würde (Business as Usual-Pfad).

### Klimaschutzziele

Aufbauend auf diesen Energieszenarien werden mögliche Klimaschutzziele für das Land Niedersachsen abgeleitet. Durch eine vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende Energieversorgung können dabei die Treibhausgasemissionen in Niedersachsen um 87,5 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden. Zur Erreichung dieses ambitionierten Zieles sind neben den Maßnahmen, die auf europäischer Ebene oder durch die Bundesregierung vorgegeben sind, weitere Maßnahmen auf Landesebene notwendig. Für Niedersachsen sind dies beispielsweise die Forcierung des Kohleausstiegs, die Schaffung von zusätzlichen Anreizen zur Gebäudesanierung und Elektromobilität, weitere Treibhausgasreduzierungen in der Landwirtschaft oder die Einwirkung auf die Bundesgesetzgebung (zum Beispiel hinsichtlich des Erneuerbare-Energien-Gesetzes).

### Ergebnisse Zusatzgutachten (zeitlich höher aufgelöste Betrachtungen)

Aus dem Gutachten wird weiterhin deutlich, dass weitergehende Betrachtungen zur zeitlich höher aufgelösten Betrachtung des Energieszenarios notwendig sind, insbesondere um die zukünftigen Kurz- und Langzeitspeicherbedarfe analysieren zu können. Für die dazu vom Niedersächsischen Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz ausgeschriebene Studie erhielt ebenfalls ein Konsortium aus dem Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, dem Institut für Solarenergieforschung Hameln und dem Energieforschungsknoten LiFE 2050 der Leibniz Universität Hannover unter Leitung des CUTEC Institutes den Zuschlag.

Die zeitlich höher aufgelösten Simulationen [2] verdeutlichen, dass für eine annähernd genaue Abschätzung des Speicherbedarfes in einem zu 100 Prozent auf Erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystem die Betrachtung mehrjähriger Zeiträume unbedingt erforderlich ist. Ein Betrachtungszeitraum über mehrere Jahre kann zu einem stark erhöhten Speicherbedarf führen, weil das Energiedargebot, also alle in der Natur vorkommenden und für die wirtschaftliche Nutzung in Betracht kommenden

Energieströme durch Wind und Sonne jährlichen Schwankungen unterliegt.

Das Hauptgutachten hatte Kurzzeitspeicher nicht explizit, sondern lediglich mit einer pauschalen Abschätzung berücksichtigt. Mit den detaillierteren Simulationen unter Einbeziehung der Kurzzeitspeicher können die Ansätze des Szenarios „100 % EE“ des Hauptgutachtens reproduziert werden. Durch die zeitlich höher aufgelöste Simulation kann der notwendige Kurzzeitspeicherbedarf des Szenarios „100 % EE“ im Hauptgutachten, zum Beispiel durch Einsatz von Li-Ionen-Batterien, mit einer Speicherkapazität von 135 GWh ermittelt werden.

Unter den gewählten Annahmen zur Kostenberechnung der wesentlichen Komponenten des Energiesystems ist es ökonomisch sinnvoll, auf die Kurzzeitspeicher (zum Beispiel Li-Ionen-Batterien) zu verzichten und die gesamte Energiespeicherung durch Elektrolyse zu leisten. Die Elektrolyseleistung ist dabei mit einer Leistung von 34,8 GW doppelt so groß wie im Szenario des Hauptgutachtens. In diesem Fall werden zudem 9 Prozent der Flächen für Freiflächenphotovoltaikanlagen eingespart.

Pumpspeicherkraftwerke könnten eine kostengünstigere Alternative zur Kurzzeitspeicherung mit Li-Ionen-Batterien darstellen. Werden im Speicherszenario Pumpspeicher anstelle von Batterien eingesetzt, so wird davon eine Kapazität von 146 GWh benötigt, um alle Vorgaben des Szenarios „100 % EE“ zu erfüllen. Trotz der kostengünstigeren Kurzzeitspeicher in diesem Speicherszenario stellt dieses dennoch unter ökonomischen Gesichtspunkten keine vorteilhaftere Lösung gegenüber dem Szenario ohne Kurzzeitspeicher dar. Dagegen steht mit Pumpspeicherkraftwerken eine erprobte Technologie zur Erbringung von Systemdienstleistungen wie Momentanreserve zur Verfügung, die für die technische Umsetzung der Szenarien notwendig ist. Bezüglich anderer Technologien (zum Beispiel Batteriespeicher mit Umrichtern) besteht dagegen noch intensiverer Forschungsbedarf.

Zusätzlich können thermische Pufferspeicher in einem Energieszenario als Flexibilitätsoption genutzt werden. Ausgehend vom Referenzszenario wird gezeigt, dass in dem entsprechenden Szenario eine Installation von 150 GWh thermischer Pufferspeicherkapazität zu einer Einsparung von etwa 13 GWh Li-Ionen-Batterien führt. Weiterhin wird durch Simulation untersucht, ob ein Ausbau von solarer Nahwärme in Kombination mit saisonaler Wärmespeicherung

systemische Vorteile gegenüber den bisher untersuchten Szenarien bringt. Die Berechnungen zeigen, dass die Installation von zusätzlich 28 GW Solarthermie in Kombination mit einer vergleichsweise kostengünstigen saisonalen Wärmespeicherung das Energiesystem zwar geringfügig verteuert (+1,8 Prozent), dafür aber die Belegung von Freifläche für die Solarenergie reduzieren kann (-9 Prozent).

Für das kostengünstigste der berechneten Szenarien, das allein auf Langzeitspeicherung mit Wasserstoff beruht, wird ein Ausbaupfad generiert. Hiervon ausgehend ist bis zum Jahr 2020 keine Wasserelektrolyse erforderlich. Danach ist unter den Modellannahmen ein linearer Anstieg der Elektrolyseleistung auf den Zielwert dieses Szenarios von 34,8 GW erforderlich. Der Bedarf an Kavernenkapazität bleibt bis 2040 klein (<1,1 TWh) und steigt dann bis 2050 auf einen Endwert von 35,6 TWh an.

Durch die stundenscharfe Simulation und die umfangreichere Betrachtung der Kostenparameter von Energiespeichern können die Kosten eines regenerativen Energiesystems noch detaillierter als im Hauptgutachten bestimmt werden. Im Ergebnis zeigt die ökonomische Optimierung, dass Batteriespeicher im Vergleich zu Elektrolyseuren und Wasserstoffspeichern zu höheren Kosten führen. In einem kostenoptimierten Energiesystem werden daher nur Wasserstoffspeicher eingesetzt. Dadurch lassen sich die Kosten für Erzeugung und Speicherung auf 9,1 Cent/kWh senken (inkl. Kosten für zusätzlichen Netzausbau). Der aus dem Hauptgutachten abgeleitete Vergleichswert (mit Batterien als Kurzzeitspeicher) lag noch bei 10,11 Cent/kWh.

### Bereitstellung von Systemdienstleistungen

Um Aussagen zur Stabilität des zukünftigen Energiesystems treffen zu können, wurde die Bereitstellung von Systemdienstleistungen betrachtet. Eine Analyse des Referenzszenarios ergibt, dass mit den dort installierten Komponenten eine sichere Energieversorgung bereits zu 4.757 Stunden von insgesamt 8.760 Stunden des Jahres gewährleistet werden kann. Für den fehlenden Zeitraum werden neue Verfahren zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen aus aktuellen Forschungsergebnissen und exemplarischen technischen Lösungen aufgezeigt. Aufbauend auf den aktuellen Forschungsansätzen werden die Optionen für ein zu 100 Prozent auf Erneuerbaren Energien beruhendes Energiesystem in Niedersachsen anhand einer

exemplarischen Rechnung vorgeschlagen. Diese Beispielrechnung zeigt, dass in einem derartig versorgten Energiesystem die Bereitstellung von Momentanreserve möglich sein kann, bei vielen Komponenten des Systems aber diesbezüglich noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Die Spannungshaltung stellt in einem zukünftigen Energieszenario genau wie heutzutage eine lokale Fragestellung dar. Dafür stehen bereits jetzt diverse Lösungsansätze zur Verfügung. Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens wird diese Fragestellung definiert und mit allgemeinen Lösungsvorschlägen aus der Literatur in Zusammenhang gebracht.

Die in den Szenarien berechneten Kosten verschiedener Energiesysteme variieren untereinander um bis zu 30 Prozent. Die Unsicherheit bezüglich der angenommenen Komponentenpreise im Jahr 2050 ist sicher recht groß. Daraus folgt, dass die hier durchgeführten Simulationen zwar Hinweise geben können, welche Konfigurationen möglich sind. Die Simulationen dürfen aber nicht als Empfehlung zum Verzicht auf gewisse Technologien missverstanden werden. Dafür ist die Datenlage aus heutiger Sicht noch zu unsicher.

Der Umstand, dass verschiedene Systemkonfigurationen zu ähnlichen Kosten führen, gibt den Akteuren und der Politik einen großen Gestaltungsspielraum, den sie für Akzeptanzprozesse nutzen können und der die Umsetzung der Energiewende positiv befördert.

### Literatur

- [1] Faulstich, M.; Beck H.-P.; Haaren, C. v.; Kuck, J.; Rode, M.; Ahmels, J.; Dossola, F.; Hingst, J. z.; Kaiser, F.; Kruse, A.; Palmas, C.; Römer, G.; Ryspaeva, I.; Schmidt-Kanefendt H.-H.; Siemers, W.; Simons, R.; Springmann, J.-P.; Yilmaz, C.: "Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050" - Gutachten im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz. Gutachten veröffentlicht am 20.04.2016. ISBN 978-3-00-052763-0, <https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/energie/rundertisch/runder-tisch-142928.html>
- [2] Faulstich, M.; Beck H.-P.; Brendel, R.; Hanke-Rauschenbach, R.; Ahmels, J.; Bensmann, A. L.; Gollenstede, J.; Hingst, J. z.; Kaiser, F.; Krüger, J.; Niepelt, R.; Römer, G.; Ryspaeva, I.; Schmidt-Kanefendt, H.-H.; Yilmaz, C. „Szenarien zur Energieversorgung in Nie-

dersachsen im Jahr 2050 - Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöste Szenarien“, Gutachten im Auftrag des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 6. Oktober 2016, <https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/energie/rundertisch/runder-tisch-142928.html>

## Daten zum Projekt

### Laufzeit:

09.12.2014 bis 20.04.2016  
(Hauptgutachten)  
08.04.2016 bis 19.10.2016  
(Zusatzgutachten)

### Projektleitung:

Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich  
(CUTEC / EFZN)

### Unter Mitwirkung von:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (EFZN)  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Brendel (ISFH)  
Prof. Dr.-Ing. Richard Hanke-Rauschenbach (IfES)  
Prof. Dr. Christina von Haaren (IUP)  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Kuck (Ostfalia)  
Prof. Dr. Michael Rode (IUP)  
Jan Ahmels, M. A. (EFZN)  
Dipl.-Ing. Astrid Lilian Bensmann (IfES)  
M. Sc. Francesca Dossola (IUP)  
Julian Gollenstede, M. Sc. (EFZN)  
Dr.-Ing. Jens zum Hingst (CUTEC)  
Dipl.-Ing. Friederike Kaiser (EFZN)  
M. Sc. Ann Kruse (CUTEC)  
Dipl.-Ing. Julian Krüger (IfES)  
Dr. Raphael Niepelt (ISFH)  
Dr. Claudia Palmas (IUP)  
Dr. Gottfried Römer (EFZN)  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Isa Ryspaeva (CUTEC)  
Dipl.-Ing. (FH) Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt (Ostfalia)  
Dr.-Ing. Werner Siemers (CUTEC)  
Ronia Simons, B.Sc (EFZN)  
Dr. Jens-Peter Springmann (EFZN)  
Dipl.-Ing. Can Yilmaz (EFZN)

## Batteriesicherheitscampus Deutschland nimmt Fahrt auf!

### Ansatz

Heutzutage befinden sich in nahezu allen technischen Geräten Batterien, die immer höheren Anforderungen genügen müssen. So müssen im Zeitalter der Elektromobilität und stationärer Großanlagen Batterien stetig steigenden Belastungen in verschiedensten Anwendungen standhalten. Zudem ziehen Lithium-Ionen-Batterien immer mehr in unsere heimischen Keller als sogenannte „Homespeicher“ für Photovoltaik ein. Die Institutionen und universitären Einrichtungen auf dem EnergieCampus in Goslar arbeiten bereits heute in verschiedensten Forschungsprojekten an den heutigen und zukünftigen Herausforderungen, welche mit der rasanten Entwicklung im Bereich der Batterietechnik verknüpft sind. Die Gewährleistung der maximalen Sicherheit von mobilen und stationären Anlagen sowie von Personen, die im täglichen Leben damit in Berührung treten, ist daher der Ansatz auf dem Batterie-Sicherheitscampus Deutschland.

### Ziel

Das von den Akteuren vor Ort gemeinsam verfolgte Ziel ist, in Zeiten stetig wachsender Herausforderungen an Batteriesysteme den Blick

nach vorne zu richten und zukunftsweisende und innovative technische Lösungen zu entwickeln. Insbesondere Hochleistungsbatterien, die unter extremen Belastungen stehen, müssen sicher sein und dürfen keine unkontrollierten Wirkungen erzeugen. Ziel ist es daher, über gemeinsame Forschungsprojekte von Wissenschaft und Wirtschaft Sicherheitskonzepte für Batterien zu entwickeln und zu verifizieren. Nur so wird es möglich sein, von zukunfts-fähigen und für den Standort Deutschland wirtschaftlich bedeutsamen Technologien, wie beispielsweise der Elektromobilität, zu profitieren.

### Herausforderungen

Mit der zunehmenden Entwicklung und Nutzung unterschiedlichster Batterie-Speichertechnologien stellen sich für Forscherinnen und Forscher kontinuierlich neue Herausforderungen. Dabei tragen vor allem neuartige Hochenergiebeziehungsweise Hochleistungs-Stromspeicher für mobile und stationäre Anwendungen zum stetigen Fortschritt und dem Gelingen der Energiewende bei.

Auf dem Batterie-Sicherheitscampus werden Forschungsarbeiten zur sicheren Anwendung



Abbildung 1: Flüssigkeitsgekühltes Batteriesystem [Quelle: AKASOL GmbH]



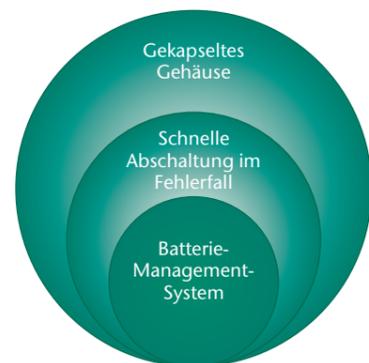
von Batterien ausgehend von kleinen Halbzellen bis hin zu großen Batteriesystemen durchgeführt. Durch die besondere, systemübergreifende Bündelung von Kompetenzen aus der elektrochemischen Verfahrenstechnik, der Sensorik und weiteren Ingenieursdisziplinen, lassen sich komplexe Problemstellungen ausführlich bearbeiten.

Im Themenfeld der Elektromobilität werden beispielsweise größere Reichweiten von Elektrofahrzeugen mit möglichst kompakten Batterien und sehr hohen Kapazitäten sowie einer schnellen und sicheren Ladetechnik benötigt. Auf dem Batterie-Sicherheitscampus wird diesbezüglich neben weiteren Projekten das ambitionierte Ziel verfolgt, in einem kurzen Ladevorgang von etwa 10 Minuten eine Reichweite von 500 km mit 100 Prozent erneuerbaren Energien und minimaler Netz- und Batteriebelastung zu laden.

Eine Batterie muss in jeder Situation sicher und zuverlässig sein und darf auch unter Extrembedingungen nicht unkontrolliert in Flammen aufgehen. Um dies zu gewährleisten, wurde ein

dreistufiges Sicherheitskonzept (s.u.) erstellt. Dieses wird fortlaufend an aktuelle Fragestellungen angepasst und weiterentwickelt. Dabei werden neben einer hochpräzisen und innovativen Sensorik auch verschiedene Betriebsstrategien und Sicherheitsmechanismen entwickelt und integriert.

Im Fokus weiterer Forschungsarbeiten steht unter anderem auch die Entwicklung von Metall-Luft-Batterien, die vor allem der Elektromobilität zum Durchbruch verhelfen sollen. Diese Systeme ziehen den Sauerstoff aus der Umgebungsluft und geben ihn beim Laden wieder ab, wodurch die Energiedichte im Vergleich zu heutigen Lithiumbatterien deutlich erhöht wird. Beim Entladen verändern sich „atmende“ Batterien chemisch irreversibel und lassen sich derzeit noch nicht langlebig wieder aufladen. Auch sind die aktuellen Ladetechnologien noch nicht ausgereift; eine zu schnelle Ladung verändert durch die entstehende Wärme die Elektrodenmaterialien und kann letztlich zum Bersten der Batterien führen. Eine angepasste Flüssigkeitskühlung stellt hier eine Lösungsalternative dar.



### Methodik

Für stationäre Energiespeicher mit Lithium-Ionen-Batterien, die zum Beispiel gekoppelt mit PV-Anlagen bereits heute zahlreich in Wohngebäuden installiert sind, bestehen im Gegensatz zu mobilen Anwendungen kaum angepasste sicherheitsrelevante Normen und Richtlinien. Technische Fehler dieser Systeme, wie sie nicht zu 100 Prozent vermieden werden können, können zu Bränden führen. Aufgrund des damit einhergehenden Vertrauensverlustes auf Verbraucherseite sowie der mit hohen Brandrisiken einhergehenden Nichtversicherbarkeit von Heimspeichern kann es zu einem Zusammenbruch dieses noch jungen Marktes kommen.

Daher sind für diese Technologien neuartige und geeignete Schutzkonzepte zu entwickeln und zu normen. Das von uns verfolgte Konzept sieht für alle Batteriesysteme eine diversitär-redundante Sicherheit auf drei Ebenen vor:

### Ebene 1 – Sensorik

Das Batterie-Management-System dient der permanenten und redundanten Überwachung der Batteriegrenzwerte. Dabei werden die kritischen Betriebszustände aller Zellen, wie etwa Überladen, Tiefentladen, Überstrom, Kurzschluss oder Temperatur, permanent überwacht und mittels einer entsprechenden Ladesteuerung auf Zellebene vermieden. Da bei einem Ausfall der Spannungsmessung das Gesamtsystem abgeschaltet wird, ist eine diversitäre Redundanz des Systems erforderlich und damit eine Überwachung des Managementsystems auf Ebene 2.

Der Einsatz der vom Fraunhofer HHI entwickelten Glasfasersensorik zur Erfassung von Strom, Temperatur und Dehnung ermöglicht eine über konventionelle Messtechnik hinausge-

hende Überwachung und kann in übliche BMS integriert werden. Dieses ist Gegenstand aktueller Forschungsprojekte wie beispielsweise „MoBat“ und „ReserveBatt“.

### Ebene 2 – Elektrik

Im Fehlerfall, insbesondere bei Kurzschlüssen, muss das Batteriesystem schnell und sicher abgeschaltet werden. Lithium-Ionen-Batterien haben einen sehr geringen Innenwiderstand, der bei externen Kurzschlüssen in sehr kurzer Zeit zu sehr hohen Kurzschlussströmen (mehrere Kiloampere) mit entsprechendem Gefahrenpotenzial führt. Die somit erforderliche schnelle Abschaltung von hohen DC-Ladeströmen ist technisch anspruchsvoll, da die zu verwendenden Schalter hohe Spannungen und hohe Ströme sehr schnell abschalten können müssen. Zudem wird bei Kurzschluss eine allpolige Abschaltung der Batterie vorgesehen. Für den Fall des Versagens der Leistungsschalter werden als Sicherheitsreserve Schmelzsicherungen auf dieser Ebene integriert. Beim falschen Laden des Systems erkennt das engmaschige Glasfaser-Messsystem mit orts- und zeitaufgelösten Temperatur- und Druckmesswerten auf der Zellebene frühzeitig sich anbahnende Fehler und veranlasst eine rechtzeitige Abschaltung der Leistungsgrößen.

### Ebene 3 – Schutzhülle

Schließlich sind die Batterien in brandhemmende Gehäuse einzubauen, deren Hauptfunktionen im Schutz der innenliegenden Lithium-Zellen vor einem thermischen Durchgehen und dem Schutz vor mechanischen Einwirkungen liegen. Elemente dieser Sicherheitsebene stellen u.a. der Schutz vor Berührungen/Stromschlägen und die Temperierung beziehungsweise thermische Isolation der Zellen und Module dar. Sie stellen darüber hinaus eine letzte Schutzschicht zur Verzögerung eines Brandes beziehungsweise dessen Eindämmung dar. Eine Auskleidung der Gehäusekomponenten mit brandhemmenden Materialien sowie eine angepasste aktive Löscheinrichtung komplettieren die Schutzmaßnahmen auf der dritten Ebene.

### Batterie-Risiko-Management

Für die sichere Installation und insbesondere für den sicheren Betrieb eines Batteriesystems

sind zusammenfassend also ausreichende Vorkehrungen zu treffen.

Neben der reinen Überwachung und Beobachtung der Batterieparameter sind für den sicheren Betrieb weitere – unter Umständen auch externe – Einflussgrößen zu betrachten, die für die Beherrschung von Gefahrensituationen nötig sind. Dieses kann zum Beispiel mit dem jeweiligen Einsatzort, der Anwendung und den technischen Randbedingungen variieren. Insgesamt ist für den sicheren Betrieb eines Batteriesystems also ein entsprechendes Batterie-Risiko-Management vorzusehen.

### Ausstattung

Das Kernstück der apparativen Ausstattung stellt das „Batterie- und Sensoriktestzentrum“ dar, welches auf 1.500 qm Fläche unter anderem die Durchführung von elektrischen, dynamischen Belastungstests bis zu 1000 V/1200 A, d.h. 1,2 MW, bis in Grenzbereiche hinein ermöglicht.

Neuartige faseroptische Sensorsysteme erfassen physikalische Eigenschaften von Zellen und Batteriesystemen sowie die orts- und zeitaufgelöste Wärmeentwicklung oder Ausdehnung in Echtzeit. Die Gasanalytik dient der Untersuchung und wissenschaftlichen Interpretation entstehender Schadgase im Falle eines Ausgases oder Abbrandes der getesteten Batterien. Darüber hinaus lassen sich Batteriesysteme

auch unter kontrollierten klimatischen Bedingungen auf ihre Funktionsfähigkeit hin untersuchen. Ferner verfügt das Batterie- und Sensoriktestzentrum über zwei Brandprüföfen mit nachgeschalteter Rauchgasreinigungsanlage, in welchen thermische Belastungstests (zum Beispiel Temperatureinheitskurve, Fuel Fire Test) durchgeführt werden können.

Mit dieser apparativen Ausstattung wird das Verhalten von Batterien in Extremsituationen systematisch und umfassend erfasst, um angepasste Sicherheitskonzepte entwickeln und erproben zu können.

## Daten zum Projekt

### Projektpartner:

- Allianz für die Region GmbH
- Wirtschaftsförderung Region Goslar GmbH & Co.KG
- TU Clausthal / Energie-Forschungszentrum
- Wolfsburg AG
- Fraunhofer HHI, Abteilung Faseroptische Sensorsysteme
- Landkreis und Stadt Goslar

### Projektkoordination:

Dr. Jens-Peter Springmann  
Dr.-Ing. Ralf Benger





## ANHANG

# 5.

# Publikationen

2016

## Bücher

- Wenzl, Heinz; Kaiser, Friederike; (Hrsg.): Sektorenkopplung der Energiesysteme durch Power to Heat: Dialogplattform des EFZN; Goslar, 14. und 15. Juli 2016  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9265-8  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.36)
- Weyer, Hartmut; Lietz, Franziska; Nadler, Christoph; Hochholzer, Christian: Batteriespeicheranlagen im Multi-Purpose-Betrieb: Energiewirtschaftsrechtliche Rahmenbedingungen: Abschlussbericht im Auftrag der EWE AG im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts green2store (Förderkennzeichen 0325521A)  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9274-0  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.38)
- Beck, Hans-Peter; Haaren, Christina von; Kuck, Jürgen; Rode, Michael; Ahmels, Jan; Dossola, Francesca; zum Hingst, Jens; Kaiser, Friederike; Kruse, Ann; Palmas, Claudia; Römer, Gottfried; Ryspaeva, Isa; Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich; Siemers, Werner; Simons, Ronia; Springmann, Jens-Peter; Yilmaz, Can: Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050 : Gutachten Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz  
2016 - 978-3-00-052763-0
- Hofmann, Lutz; Geldermann, Jutta; Beck, Hans-Peter; Eggert, Frank; Engel, Bernd; Weyer, Hartmut; Horn, Maximilian; Lietz, Franziska; Loges, Hauke; Lühn, Tobias; Schlömer, Gerrit; Schnieder, Raimund; Ahmels, Jan: Forschungsprojekt e-home Energieprojekt 2020: Kurzfassung der wissenschaftlichen Projektergebnisse 2011 – 2016  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9396-9  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.43)
- Beck, Hans-Peter; Danzer, Michael; Jossen, Andreas; Kneiske, Tanja; Lux, Stephan; Sauer, Dirk Uwe; Styczynski, Z. A.; Bart, Heike; Bayer, Björn; Klee Barillas, Joaquin; Dennenmoser, Martin; Gitis, Alexander; Idlbi, Basem; Klambunde, Christian; Koring, Karolina; Moskalenko, Natalia; Naumann, Maik; Landau, Markus; Puchta, Matthias; Raab, Sebastian; Shan, Weiwei; Spielmann, Verena; Lando, Eric Tchoupou; Appen, Jan von; Wenzl, Heinz: Potentiale elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN) : Abschlussbericht  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9423-2  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.44)
- Faulstich, Martin; Beck, Hans-Peter; Brendel, Rolf; Hanke-Rauschenbach, Richard; Ahmels, Jan; Bensmann, Astrid Lilian; Gollenstede, Julian; zum Hingst, Jens; Kaiser, Friederike; Krüger, Julian; Niepelt, Raphael; Römer, Gottfried; Ryspaeva, Isa; Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich; Yilmaz, Can: Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050: Zusatzgutachten zeitlich höher aufgelöster Szenarien  
Hannover: Niedersächsisches Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz  
2016

## Dissertationen

- Speckmann, Marcus: Bereitstellung von Regelleistungen durch fluktuierende Erzeuger am Beispiel der Windenergie  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9180-4  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.35)
- Xing, Wei: Untersuchung des geomechanischen Verhaltens von Schichtsalzen aus China in Abhängigkeit von Verunreinigungen  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9273-3  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.37)
- Minke, Christine: Techno-ökonomische Modellierung und Bewertung von stationären Vanadium-Redox-Flow-Batterien im industriellen Maßstab  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9308-2  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.40)
- Schmiesing, Johannes: Regelbare Ortsnetztransformatoren zur Integration regenerativer

- Erzeugungsanlagen in ländlichen Mittelspannungsnetzen  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9292-4  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.39)
- Chen, Yong: Virtuelle Synchronmaschine (VISMA) zur Erbringung von Systemdienstleistungen in verschiedenen Netzbetriebsarten  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9331-0  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.41)
- Stubbe, Markus: Aktive Dämpfung von multifrequenten Torsionsschwingungen in verzweigten Antriebssystemen  
Göttingen: Cuvillier  
2016 - 978-3-7369-9374-7  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.42)
- Gimpel, Thomas: Preparation and characterization of femtosecond laser sulfur doped silicon solar cells  
München: Dr. Hut  
2016 - 978-3-8439-2866-3

## Beiträge in referierten Fachzeitschriften

- Richter, Harald: Non-classical computation of active-, apparent- and reactive powers and of the power- and distortion factors  
International journal of smart grid and clean energy – Bd. 5 (2016) 1, S. 56-71
- Orghici, Rozalia; Bethmann, Konrad; Zywiets, Urs; Reinhardt, Carsten; Schade, Wolfgang: All-polymer arrayed waveguide grating at 850 nm : design, fabrication, and characterization  
Optics letters - Bd. 41 (2016) 17, S. 3940-3943
- Weyer, Hartmut; Lietz, Franziska: Neuregelungen für Stromspeicher : Strommarktgesetz, EEG 2017, Digitalisierungsgesetz, Stromsteuerrecht  
Versorgungs-Wirtschaft : Monatszeitschrift für Betriebswirtschaft, Wirtschaftsrecht und Steuerrecht der Elektrizitäts-, Gas- und Wasserwerke – Bd. 68 (2016) 9, S. 261-267
- Bredemeyer, N.; Tenhumberg, N.; Becker, M.; Polcyn, G. D.; dos Santos, Antonio Rodolfo; Kunz, Ulrich; Schafner, Katharina; Turek, Thomas: Redox-Flow-Speicher – Vom Labor in die großtechnische Anwendung  
Chemie Ingenieur Technik – Bd. 88 (2016) 9, S. 1257
- Liu, Hejuan; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Gou, Yang; Sun, Xiaoling: Numerical investigation of the formation displacement and caprock integrity in the Ordos Basin (China) during CO<sub>2</sub> injection operation  
Journal of Petroleum Science and Engineering – Bd. 147 (2016) 168-180
- Bockelmann, Marina; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas: Electrically rechargeable zinc-oxygen flow battery with high power density  
Electrochemistry Communications – Bd. 69 (2016) 24-27
- Wagner, Sebastian; Oberland, Alexander; Turek, Thomas: Analytical approach for evaluation of lithium-ion battery cells  
Energy technology : generation, conversion, storage, distribution – Bd. 4 (2016) 12, S. 1543-1549
- Minke, Christine; Hickmann, Thorsten; dos Santos, Antonio Rodolfo; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas: Cost and performance prospects for composite bipolar plates in fuel cells and redox flow batteries  
Journal of Power Sources – Bd. 305 (2016) 182-190
- Reinicke, Kurt M.; Weichmann, Martina J.: Risk assessment of abandoned wells affected by CO<sub>2</sub> Oil gas : European magazine - Bd. 42 (2016) 2, S. 125-129
- Xie, Heping; Tang, Liang; Wang, Yufei; Liu, Tao; Hou, Michael Z.; Wang, Jinlong; Wang, Tao; Jiang, Wen; Were, Patrick: Feedstocks study on CO<sub>2</sub> mineralization technology  
Environmental Earth Sciences – Bd. (2016) 75, S.
- Becker, Maik; Bredemeyer, Niels; Tenhumberg, Nils; Turek, Thomas: Polarization curve measurements combined with potential probe sensing for determining current density distribution in vanadium redox-flow batteries  
Journal of Power Sources – Bd. 40 (2016) Volume 307, S. 826-833
- Wagner, Sebastian; Oberland, Alexander; Turek, Thomas: Analytical approach for evaluation of lithium-ion battery cells  
Energy Technology – Bd. Volume 4 (2016) Issue 12, S. S. 1543-1549
- Shi, Lei; Kunz, Ulrich: Mechanical behavior during electrochemical and mechanical deactivation of an aged electrode in a lithium-ion pouch cell  
Energy Technology – Bd. Volume 4 (2016) Issue 12, S. S. 1520-1530
- Albrecht, Daniel; Wulfmeier, Hendrik; Fritz, Holger: Preparation and characterization of c-LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> thin films prepared by pulsed laser deposition for lithium-ion batteries  
Energy Technology – Bd. Volume 4 (2016) Issue 12, S. S. 1558-1564
- Wulfmeier, Hendrik; Omelcenko, Alexander; Albrecht, Daniel; Klimm, Detlef; El Mofid, Was-

*sima; Strafela, Marc; Ulrich, Sven; Bund, Andreas; Fritze, Holger: Thermal Stability of Materials for Thin-Film Electrochemical Cells Investigated by Thin-Film Calorimetry MRS Advances – Bd. Volume 1 (2016) Issue 15, S. S. 1043-1049*

*Suhak, Yuriy; Schulz, Michal; Wulfmeier, Hendrik; Johnson, Ward L.; Sotnikov, Andrei; Schmidt, Hagen; Ganschow, Steffen; Klimm, Detlef; Fritze, Holger: Langasite-type resonant sensors for harsh environments MRS Advances – Bd. Volume 1 (2016) Issue 21, S. S. 1513-1518*

### Zeitschriftenbeiträge

*Nakhaie, Soroush; Beck, Hans-Peter; Springmann, Jens-Peter: Ausbaubedarf im deutschen Transportnetz - eine Anwendung auf die Gleichstrompassage Süd-Ost ew-Magazin für die Energiewirtschaft – Bd. 115 (2016) 1, S. 52-56*

*Weyer, Hartmut; Lietz, Franziska: Belastung bei Stromeinspeicherung in dezentrale Batteriespeicher einer Energy Storage Cloud Energiewirtschaftliche Tagesfragen – Bd. 66 (2016) 9, S. 89-93*

*Redox-Flow-Batterien – effiziente stationäre Energiespeicher ti! Technologie-Informationen – Bd. (2016) Ausgabe 3, S. S. 22*

### Beiträge in Tagungsbänden

*Hashemifarad, Ali; Siemers, Werner; Hingst, Jens zum: Anwendung von Wärmespeichern in modernen dezentralen Energieversorgungssystemen Sektorenkopplung der Energiesysteme durch Power to Heat : Dialogplattform des EFZN ; Goslar, 14. und 15. Juni 2016 / Göttingen: Cuvillier 2016 - 978-3-7369-9265-8 - 48-56*

*Richter, Harald: A power plant with storage but without fuel or exhausts for smoothing 'green' electricity 2016 the 4th IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE) ; Oshawa, Canada, 21. – 24. August 2016 / Piscataway, NJ: IEEE 2016 - 978-1-5090-5111-3 - 236-243*

### Beiträge in Sammelbänden

*Lietz, Franziska: § 11 EEG 2014 [Kommentierung] Energierecht : Energiewirtschaftsgesetz mit Verordnungen, EU-Richtlinien, Gesetzesmaterialien, Verbändevereinbarungen; Gesetze und Verordnungen zu Energieeinsparung und Umweltschutz sowie andere energiewirtschaftlich relevante Rechtsregelungen; Kommentar; Bd. 3 (Losebl.-Ausg. ab EL 87) / Danner, Wolfgang (Hrsg.) München: Beck 2016 - 978-3-406-36464-8 - 81 EEG 2014 § 11 S. 1-26*

*Lietz, Franziska: § 60 EEG 2014 [Kommentierung] Energierecht : Energiewirtschaftsgesetz mit Verordnungen, EU-Richtlinien, Gesetzesmaterialien, Verbändevereinbarungen; Gesetze und Verordnungen zu Energieeinsparung und Umweltschutz sowie andere energiewirtschaftlich relevante Rechtsregelungen; Kommentar; Bd. 3 (Losebl.-Ausg. ab EL 87) / Danner, Wolfgang (Hrsg.) München: Beck 2016 - 978-3-406-36464-8 - 81 EEG 2014 § 60 S. 1-32*

### Studien- und Abschlussarbeiten

*Grabow, Jens: Bestimmung der Diffusionskoeffizienten von Zinkaten in KOH Elektrolyten mittels potenziodynamischer RDE Messungen 2016*

*Dilek, Burcu: Analyse und Modellierung des Gesamtsystems einer Redox-Flow Batterie 2016*

*Martin, Jan: Entwicklung von Eisen-Nickel-Katalysatoren für die Sauerstoffentwicklung in der alkalischen Wasserelektrolyse 2016*

*Wu, Chen: Charakterisierung des Einflusses von Elektrodenbiegung auf das elektrochemische und mechanische Verhalten der Lithium-Ionen Pouch-Zelle 2016*

*Yao, Gumin: Charakterisierung poröser Glasmembranen in der Vanadium-Redox-Flow-Batterie 2016*

*Kreitz, Bjarne: Simulation und experimentelle Validierung eines Modells für die alkalische Wasserelektrolyse 2016*

*Bauer, Stina: Synthese und Verwendung von Hydrochinon-Chinon-Paaren für Redox-Flow Batterien 2016*

*Bierwirth, Malte; Braum, Marvin; Kreitz, Bjarne; Schwering, Frank; Wiegmann, Jens: Auslegung und Wirtschaftlichkeitsstudie einer 10 MV Vanadium Redox-Flow Batterie 2016*

### Vorträge

*Reinicke, Kurt M.: Integritätsmanagement im Lebenszyklus von Tiefbohrungen Gehalten am 01.11.2016 anlässlich 9. Niedersächsische Energietage, 1. – 2.11.2016 in Goslar*

*Haug, P.; Kreitz, Bjarne, Turek, Thomas: Modelling and simulation of an alkaline water electrolyzer Gehalten am 28.09.2016 anlässlich Electrochemistry vom 26.09.2016 – 28.09.2016 in Goslar*

*dos Santos, Antonio Rodolfo; Prumbohm, Eva; Zielinski, Oliver; Turek, Thomas; Kunz, Ulrich: Experimentally validated flow rate model for a redox-flow battery Gehalten am 27.09.2016*

*anlässlich der GDCh Electrochemistry in Goslar vom 26 – 28.9.2016 in Goslar*

*Koj, M.; Haug, P.; Turek, Thomas: Influence of electrode aperture diameter and shape on oxygen evolution reaction in alkaline water electrolysis Gehalten am 27.09.2016 anlässlich GDCh Electrochemistry 2016 in Goslar*

*Mögelin, Horst; Zhong, H.; Barascu, A.; Krenkel, S.; Wassersleben, S.; Enke, D.; Kunz, Ulrich: Application of Porous Glass Membranes in Redox Flow Batteries – Analysis of the Influences of Membrane Thickness and Pore Structure Gehalten am 27.09.2016 anlässlich GDCh Electrochemistry 2016 in Goslar*

*Schafner, Katharina; Becker, Maik; Tenhumberg, N.; Polcyn, G.; Bredemeyer, N.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas: Determination of influencing factors for transport processes through membranes in vanadium redox-flow batteries Gehalten am 27.09.2016 anlässlich der GDCh Electrochemistry 2016 vom 26. – 28.09.2016 in Goslar*

*Feder, René; Fritze Holger: Homo-Epitaxial Deposition of Piezoelectric Langasite Thin Films Gehalten am 27.09.2016 anlässlich Materials Since and Engineering, 27.09.–29.09.2016 in Darmstadt*

*Minke, Christine; Turek, Thomas: Do membranes determine the economic viability of redox flow batteries?*

*Gehalten am 26.09.2016 anlässlich Electrochemistry 2016, September 26 – 28, 2016 in Goslar*

*Minke, Christine: Kosten und Anwendungsgebiete großindustrieller Vanadium-Redox-Flow-Batterien Gehalten am 20.09.2016*

*anlässlich 5. Forum Zukunftsfragen Energie: Energiespeicher und -systeme, Kompetenzzentrum Energie, 20. September 2016 in Osnabrück*

*Haug, P.; Kreitz, Bjarne; Turek, Thomas: Modellierung und Simulation einer alkalischen Wasserelektrolyse Gehalten am 14.09.2016 anlässlich ProcessNet-Jahrestagung vom 12.09.2016 – 15.09.2016 in Aachen*

*Bredemeyer, N.; Becker, Maik; dos Santos, Antonio Rodolfo; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas: Redox-Flow-Speicher – Vom Labor in die großtechnische Anwendung Gehalten am 13.09.2016*

*anlässlich ProcessNet-Jahrestagung vom 12.09. – 15.09.2016 in Aachen*

*Haug, P.; Koj, M.; Turek, Thomas: Influence of electrolyte management on gas purity in alkaline water electrolysis Gehalten am 13.06.2016 anlässlich World Hydrogen Energy Conference 2016 in Sargossa*

*Mögelin, Horst; Yao, G.; Barascu, A.; Meyer, R.; Enke, D.; Kunz, Ulrich: Application of Porous Glass Membranes in Redox Flow Batteries - Analysis of the Influences of Membrane Thickness, Pore Structure and Surface Modification Gehalten am 08.06.2016*

*anlässlich International Flow Battery Forums 2016 in Karlsruhe*

*Schafner, Katharina; Becker, Maik; Tenhumberg, N.; Bredemeyer, N.; Polcyn, G.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas: Experimental validation of a zero-dimensional VFB model including transport processes through the membrane Gehalten am 08.06.2016 anlässlich International Flow Battery Forum – IFBF 2016 in vom 07.–09.06.2016 in Karlsruhe*

*Schafner, Katharina; Bierwirth, Malte; Braum, Marvin; Kreitz, Bjarne; Schwering, Frank; Wiegmann, Jens; Prumbohm, Eva; Minke, Christine; Turek, Thomas: Design and feasibility study of a 10 MW industrial-scale vanadium redox-flow battery Gehalten am 07.06.2016*

*anlässlich International Flow Battery Forum – IFBF 2016, Juni 7 – 9, 2016 in Karlsruhe*

*Feder, René; Fritze, Holger: Abscheidung von Langasit mittels Laserablation zur Herstel-*

- lung hochtemperaturstabiler piezoelektrischer Sensorschichten  
Gehalten am 10.05.2016  
anlässlich Sensoren und Messsysteme 2016, 10.05.–11.05.2016 in Nürnberg  
*Haug, P.; Koj, M.; Turek, Thomas*: Einfluss der Prozessführung auf die Gasqualität der alkalischen Wasserelektrolyse  
Gehalten am 02.05.2016  
anlässlich ProcessNet – Jahrestreffen Reaktionstechnik 2016 in Würzburg  
*Ajala, Ibrahim Bengher, R.; Beushausen, L.; Wenzel, H.; Beck, H.-P.*: Ageing of lithium-ion batteries in high dynamic applications  
Gehalten am 26.04.2016  
anlässlich Kraftwerk Batterie, 26.–27. April 2016 in Münster  
*Ajala, Ibrahim Bengher, R.; Beushausen, L.; Wenzel, H.; Beck, H.-P.*: Virtual Inertia with high power batteries  
Gehalten am 16.03.2016  
anlässlich International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2016, 16.–17.03.2016 in Düsseldorf  
*Feder, René; Spemann, D.; Fritze, Holger*: PLD zur epitaktischen Abscheidung hochtemperaturstabiler piezoelektrischer Funktionsschichten  
Gehalten am 15.03.2016 anlässlich 23. Erfahrungsaustausch Oberflächentechnologien mit Plasma- und Ionenstrahlprozessen, 15.03.–17.03.2016 in Mühlleithen  
*Mögelin, Horst; Barascu, A.; Meyer, R.; Enke, D.; Kunz, Ulrich*: Application of Porous Glass Membranes in Redox Flow Batteries – Analysis of the Influences of Membrane Thickness, Pore Structure and Surface Modification  
Gehalten am 02.03.2016 anlässlich DECHEMA 28. Deutsche Zeolithe Tagung 2016 in Gießen

## 2017

## Bücher

- Beck, Hans-Peter; Kappenberg, Knut; (Hrsg.)*: European North Sea Energy Alliance (“ENSEA”) FP7-2012-2013-1: 320024 : (Duration: 01.10.2012-31.12.2015) : Final Report  
Göttingen: Cuvillier  
2017 - 978-3-7369-9490-4  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.45)  
*Beck, Hans-Peter; Wenzl, Heinz; (Hrsg.)*: Sektor-kopplung Strom, Wärme und Kälte : 3. Dia-

- logplattform Power-to-Heat : Berlin, 15. und 16. Mai 2017  
Göttingen: Cuvillier  
2017 - 978-3-7369-9532-1  
(Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd.46)  
*Turschner, Dirk; Beushausen, Lennart; Gollenstede, Julian; Engel, Bernd; Rauscher, Florian; Seidel, Julia; Unger, Daniel*: Technische Mindestherzeugung des Kraftwerksparks bis zum Jahr 2030 in Niedersachsen und Deutschland  
Göttingen: Cuvillier  
2017 - 9783736996267  
(EFZN-Schriftenreihe; Bd.48)

## Dissertationen

- Lietz, Franziska*: Rechtlicher Rahmen für die Power-to-Gas-Stromspeicherung  
Baden-Baden: Nomos  
2017 - 978-3-8487-4267-7  
(Schriften zum Umweltenergierecht; Bd.25)  
*Aoun, Nadia*: Aktivierung, Desaktivierung und Reaktivierung von Direkt-Methanol-Brennstoffzellen  
München: Verlag Dr. Hut  
2017 - 978-3-8439-3098-7  
*Shi, Lei*: Elektrochemische Untersuchungen von mechanisch beanspruchten Elektrodenmaterialien und Elektroden für Lithium-Ionen Batterien  
2017

## Beiträge in referierten Fachzeitschriften

- Li, Xin; dos Santos, Antonio Rodolfo; Drache, Marco; Ke, Xi; Gohs, Uwe; Turek, Thomas; Becker, Maik; Kunz, Ulrich; Beuermann, Sabine*: Polymer electrolyte membranes prepared by pre-irradiation induced graft copolymerization on ETFE for vanadium redox flow battery applications  
Journal of Membrane Science – Bd. 524 (2017) 419–427  
*Minke, Christine; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas*: Carbon felt and carbon fiber : a techno-economic assessment of felt electrodes for redox flow battery applications  
Journal of Power Sources – Bd. 342 (2017) 116–124  
Determination of shale osmotic pressure using spontaneous potential log  
Environmental Earth Sciences – Bd. (2017) 76, S.  
*Were, Patrick; Li, Zhan-dong; Zhang, Li-shuang;*

- Wang, Dian-ju*: Sedimentary Characteristics of 1st member of Yaojia Formation in Zhaoyuan-Taipingchuan region of Songliao Basin  
Journal of Petroleum Science and Engineering – Bd. (2017) 148, S. 52–63

- Numerical study on hydraulic fracturing in tight gas Formation in consideration of thermal effects and THM coupled processes  
Journal of Petroleum Science and Engineering – Bd. (2017) 146, S. 241–254  
*Rauscher Thomas; Müller, Christian Immanuel; Gabler, Andreas; Gimpel, Thomas; Köhring, Michael; Kieback, Bernd; Schade, Wolfgang; Röntzsch, Lars*: Femtosecond-laser structuring of Ni electrodes for highly active hydrogen evolution  
Electrochimica Acta – Bd. 58 (2017) Volume 247, S. 1130–1139  
*Minke, Christine; Kunze, Ulrich; Turek, Thomas*: Techno-economic assessment of novel vanadium redox flow batteries with large-area cells  
Journal of Power Sources – Bd. 41 (2017) Volume 361, S. 105–114  
*Haug, Philipp; Kreitz, Bjarne; Koj, Matthias; Turek, Thomas*: Process modelling of an alkaline water electrolyzer  
International Journal of Hydrogen Energy – Bd. Jahrgang 42 (2017) Issue 24, S. S. 15689–15707  
*Becker, Maik; Bredemeyer, Niels; Tenhumberg, Nils; Turek, Thomas*: Kinetic studies at carbon felt electrodes for vanadium redox-flow batteries under controlled transfer current density conditions  
Electrochimica Acta – Bd. 58 (2017) Volume 252, S. 12–24  
*Haug, Philipp; Koj, Matthias; Turek, Thomas*: Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis  
International Journal of Hydrogen Energy – Bd. Jahrgang 42 (2017) Issue 15, S. S. 9406–9418  
*Yilmaz, Can; Turek, Thomas*: Modeling and simulation of the use of direct reduced iron in a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions  
Journal of Cleaner Production – Bd. (2017) Volume 164, S. S. 1519–1530  
*Yilmaz, Can; Wendelstorf, Jens; Turek, Thomas*: Modeling and simulation of hydrogen injection into a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions  
Journal of Cleaner Production – Bd. (2017) Volume 154, S. S. 488–501  
*Omelenko, Alexander; Wulfmeier, Hendrik; Albrecht, Daniel; El Mofid, Wassima; Ivanov, Svetlozar; Bund, Andreas; Fritze, Holger*: Thin-

- film calorimetry: In-situ characterization of materials for lithium-ion batteries  
International Journal of Materials Research – Bd. Jg. 108 (2017) Ausg. 11, S. S. 904–919

## Zeitschriftenbeiträge

- Spielmann, Verena; Wenzl, Heinz; Beck, Hans-Peter; Danzer, Michael; Gitis, Alexander; Klambunde, Christian; Barillas, Joaquin Klee; Kneiske, Tanja; Koring, Karolina; Lux, Stephan; Moskalenko, Natalia; Naumann, Maik*: Potenziale elektrochemischer Speicher : Flexibilität im künftigen Stromversorgungssystem  
ew-Magazin für die Energiewirtschaft – Bd. 116 (2017) 3, S. 56–59  
*Winde, Frank; Kaiser, Friederike; Erasmus, Ewald*: Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydroelectric energy storage schemes  
Renewable and Sustainable Energy Reviews – Bd. (2017) 78, S. 668–682  
Roadmap Chemical Reaction Engineering an initiative of the ProcessNet Subject Division  
Chemical Reaction Engineering  
2nd edition – Bd. (2017)  
*Koring, K.; Maubach, K.-D.; Beck, H.-P.*: Fehlallokationen der Netzkosten zwischen Tarifgebieten und Kundengruppen : Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik  
Strom ew - Magazin für die Energiewirtschaft – Bd. (2017) 7/2017, S. S. 22–25  
*Spielmann, Verena; Wenzl, Heinz; Beck, H.-P.; Danzer, Michael; Gitis, Alexander; Klambunde, Christian; Klee Brillas, Joaquin; Kneiske, Tanja; Koring, Karolina; Lux, Stephan; Moskalenko, Natalia; Naumann, Maik*: Einsatzmöglichkeiten in Netzen und im Regelleistungsmarkt : Potenziale elektrochemischer Speicher ew – Magazin für die Energiewirtschaft – Bd. (2017) 4/2017, S. S. 54–58

## Beiträge in Tagungsbänden

- Schröder, Sebastian; Fritze, Holger*: Langasite-based Microbalance for the Determination of the Non-Stoichiometry in Praseodymium-Cerium Thin Films at Elevated Temperatures  
Tagungsband AMA Konferenz 2017 – SENSOR + TEST 2017 /  
2017 - 978-3-9816876-4-4 - S. 98–103  
*Omelenko, Alexander; Wulfmeier, Hendrik; Fritze, Holger*: Thin-Film Calorimeter for High-Temperature Applications: Thermodynamic Characterization on Piezoelectric Langasite Temperature Sensors

Tagungsband AMA Konferenz 2017 – SENSOR + TEST 2017 / 2017 - 978-3-9816876-4-4 - S. 485–490  
*Beushausen, L.; Benger, R.; Gollenstede, J.; Werther, B.; Beck, H.-P.*: Dynamic Requirements on LFP Batteries for Providing Virtual Inertia  
 NEIS Conference 2016 : Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern / Wiesbaden: Springer Vieweg 2017 - 978-3-658-15028-0 - S. 103–107

### Studien- und Abschlussarbeiten

*Zhong, Haiyan*: Einsatzmöglichkeiten von porösen Glasmembranen in Redox-Flow-Batterien – Untersuchungen zum Einfluss von Membrandicke, Porenstruktur und Oberflächenmodifizierung 2017  
*Potthoff, Pascal*: Ermittlung von Membranwiderständen für Vanadium Redox-Flow Batterien 2017  
*Rudolph, Lukas*: Ionische Flüssigkeiten als Elektrolyt für Redox-Flow-Batterien 2017  
*Botero, Juliana Rivas*: Einfluss der Elektrodengeometrie auf die Zellspannung der Sauerstoffentwicklung in der alkalischen Wasserelektrolyse 2017  
*Kroner, Isabelle*: Untersuchungen zur Eignung eines Wirbelstromsensors für die Leitfähigkeit von Bipolarplatten aus Kohlenstoff-Polymer-Compound 2017  
*Franzen, David*: Untersuchung der Einsatzmöglichkeit verschiedener Kohlenstoffmaterialien zur Kapazitätserhöhung von Vanadium Redox-Flow Batterien 2017  
*Eichler, Christian*: Betriebsstrategien für eine industrielle Vanadium Redox-Flow Batterie 2017  
*Kubicka, Alexander; Steffens, Dirk; Raude, Steffen; Plett, Thorben*: Kapazitätsausgleichsstrategien einer Vanadium Redox-Flow Batterie im industriellen Maßstab 2017  
*Hamann, Kevin*: Aufbau eines Prüfstands zur Untersuchung des Kurzschlussverhaltens von Lithium-Ionen Batterien, Bachelorarbeit 2017  
*Janssen, Marcel*: Konzeptentwicklung eines Last- und Lademanagements als Bestandteil

eines übergeordneten Leitsystems für den Einsatz von Elektrobussen der Hamburger Hochbahn AG, Bachelorarbeit 2017

### Sonstige Publikationen

*Beck, H.-P.; Simons, Ronia; Kappenberg, Knut*: Green Offshore : Nachnutzung der vorhandenen offshore Infrastrukturen in der Nordsee durch Speichertechnologien für erneuerbare Energien, PtJ-Abschlussbericht

### Vorträge

*Lennart Beushausen, Deblon; Benger; Gollenstede; Beushausen; Beck*: Synthetic Inertia Reserve supply from grid integrated high power battery systems  
 Gehalten am 08.12.2017  
 anlässlich Electricity 2017, 8.–11.12.2017 in Eilat  
*Ajala, Ibrahim; Kreth; Benger*: Netzanbindung von Schnellladestationen: Batterie-elektrischer Antrieb oder Brennstoffzelle  
 Gehalten am 23.10.2017  
 anlässlich EWork Praktikerseminar, 23.10.2017 in Berlin  
*Bauer, Stina; Kaufmann, D.E.; Turek, Thomas*: Bestimmung der Eigenschaften von chinonhaltigen Elektrolytlösungen für den Einsatz in organischen Redox-Flow Batterien  
 Gehalten am 12.09.2017  
 anlässlich GDCh Wissenschaftsforum 2017 vom 10.09.2016 – 14.09.2017 in Berlin  
*Prumbohm, Eva; Mögelin, Horst; Barascu, A.; Krenkel, S.; Enke, D.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas*: Modellierung einer Vanadium Redox-Flow Batterie mit poröser Glasmembran  
 Gehalten am 12.09.2017  
 anlässlich GDCh Wissenschaftsforum 2017 vom 10.09.2017 – 14.09.2017 in Berlin  
*Schafner, Katharina; Becker, Maik; Turek, Thomas*: Bestimmung von Membranwiderständen in Vanadium Redox-Flow Batterien  
 Gehalten am 12.09.2017  
 anlässlich GDCh Wissenschaftsforum Chemie 2017 vom 10.09. – 14.09.2017 in Berlin  
*Kunle, E.; Yilmaz, Can; Simons, Ronia; Kappenberg, Knut*: A System-Wide Approach for the Integration of High Shares of Renewable Energy Sources with Particular Regard to Frequency Stabilisation  
 Gehalten am 06.09.2017  
 anlässlich 1st International Conference on Large-Scale Grid Integration of Renewable

Energy in India, 6.–8. September 2017 in Neu Delhi

*Ajala, Ibrahim; Benger; Kreth*: Regenerative Elektrotankstellen für eine nachhaltige Mobilität  
 Gehalten am 31.08.2017  
 anlässlich WindBar im Regionalverband Braunschweig des Bundesverbandes Windenergie, 31.08.2017 in Goslar  
*Haug, P.; Koj, M.; Turek, Thomas*: Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis  
 Gehalten am 12.07.2017 anlässlich World Hydrogen Technology Convention vom 09.07.2017 – 12.07.2017 in Prag  
*Koj, M.; Haug, P.; Gimpel, Thomas; Schade, Wolfgang; Turek, Thomas*: The influence of laser structured nickel meshes on electrochemical losses for oxygen evolution in alkaline water electrolysis  
 Gehalten am 10.07.2017 anlässlich World Hydrogen Technology Convention vom 09.07.2017 – 12.07.2017 in Prag  
*Ajala, Ibrahim; Gollenstede, Julian*: The necessity of synthetic inertia due to the reduction of conventional power plants  
 Gehalten am 12.06.2017  
 anlässlich Conference 'Dynamics in Power Systems – From Science to Industry', 12. – 14. Juni 2017 in Potsdam  
*Mögelin, Horst; Barascu, A.; Krenkel, S.; Wassersleben, S.; Enke, D.; Kunz, Ulrich*: Effect of Pore Size of Porous Glass Membranes on the Performance of Vanadium Redox-Flow Batteries  
 Gehalten am 06.06.2017  
 anlässlich 11th European Symposium on Electrochemical Engineering vom 04.06.2017 – 08.06.2017 in Prag  
*Turek, Thomas; Haug, P.; Koj, M.; Kreitz, Bjarne; Trinke, P.; Bensmann, B.; Hanke-Rauschen-*

*bach, R.*: Gas purity in PEM and alkaline water electrolysis

Gehalten am 05.06.2017  
 anlässlich European Symposium on Electrochemical Engineering vom 04.06.2017 – 08.06.2017 in Prag  
*Schafner, Katharina; Becker, Maik; Turek, Thomas*: Capacity balancing methods for vanadium redox flow batteries  
 Gehalten am 05.06.2017  
 anlässlich 11th European Symposium on Electrochemical Engineering vom 04.06. – 08.06.2017 in Prag  
*Haug, P.; Kreitz, Bjarne; Koj, M.; Turek, Thomas*: Process modelling of an alkaline water electrolyzer  
 Gehalten am 23.05.2017  
 anlässlich ProcessNet – Jahrestreffen Reaktionstechnik 2017 vom 22.05.2017 – 24.05.2017 in Würzburg  
*Koj, M.; Haug, P.; Turek, Thomas*: Influence of electrode geometry in alkaline water electrolysis  
 Gehalten am 22.05.2017  
 anlässlich ProcessNet – Jahrestreffen Reaktionstechnik 2017 vom 22.05.2017 – 24.05.2017 in Würzburg  
*Mögelin, Ulrich; Barascu, A.; Krenkel, S.; Wassersleben, S.; Enke, D.; Kunz, Ulrich*: Effect of Pore Size of Porous Glass Membranes on the Performance of Vanadium Redox-Flow Batteries  
 Gehalten am 01.03.2017  
 anlässlich DECHEMA 29. Deutsche Zeolith Tagung 2017 in Frankfurt  
*Minke, Christine*: Redox-Flow-Batterien  
 Gehalten am 08.02.2017  
 anlässlich 1. Innovationstag des Chemie-Netzwerks Harz, 8. Februar 2017 in Clausthal-Zellerfeld

## Impressum

### **Herausgeber**

Vorstand des Forschungszentrums  
Energiespeichertechnologie (EST)  
Am Stollen 19 A  
38640 Goslar  
Telefon: (0 53 21) 38 16-80 00  
Telefax: (0 53 21) 38 16-80 09  
E-Mail: [info-est@tu-clausthal.de](mailto:info-est@tu-clausthal.de)  
Internet: [www.est.tu-clausthal.de](http://www.est.tu-clausthal.de)

### **Redaktion**

Dr. Jens-Peter Springmann, Fee Strahler

### **Lektorat**

Sandra Köhler, [sandrakoehler1975@gmail.com](mailto:sandrakoehler1975@gmail.com)

### **Layout und Satz**

Melanie Bruchmann

### **Bildnachweis**

Titelbild: Fotolia.com (©Ismagilov)  
Christian Kreuzmann: S. 4, 6, 12, 16, 18, 19, 20, 22, 37, 92, 103, 104  
Olaf Möldner: S. 7, 8, 9

Hier nicht erwähnte Fotos entstammen dem Privatarchiv der jeweils abgebildeten Personen oder dem Archiv der TU Clausthal.

### **Druck**

Quensen Druck+Verlag GmbH, Hildesheim

März 2018