



# TU Clausthal

## EST

Forschungszentrum  
Energiespeichertechnologien

## Jahresbericht 2018/2019

des Forschungszentrums  
Energiespeichertechnologien (EST)





Jahresbericht 2018/2019  
des Forschungszentrums  
Energiespeichertechnologien (EST)



# Inhalt

1. Entwicklung der Forschungsagenda .....	4
2. Geschäftsbericht und Infrastruktur .....	8
3. Strategiebildende Forschungsprojekte in den Jahren 2018/2019.....	14
CliMb: Katalytische und mikrobielle Methanisierung als Basis für eine nachhaltige Energiespeicherung.....	16
HyINTEGER: Untersuchungen zur Integrität von Bohrungen und technischen Materialien in geologischen H <sub>2</sub> -Untergrundreservoir.....	23
ReserveBatt: Systemdienstleistungen für den sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems – Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien.....	30
CoNDyNet II: Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze .....	33
ZiLsicher: Zink-Luft-Akkumulator als sicherer elektrochemischer Speicher für emissionsarme und explosionsgeschützte Industriebereiche .....	37
HiPo-Stack: Berechnung von Strömungsfeldern für Bipolarplatten in Redox-Flow-Batterien .....	42
EXTRUSIONSPLATTE: Neuartige großflächige Bipolarplatten im Extrusionsverfahren für Redox-FlowBatterien .....	46
ENERA: Weiterentwicklung des Strommarktdesigns .....	52
KonAIR: Konzentrationsabhängige Industrieofenregelung – Teilvorhaben: Sensorschicht- und Sensorentwicklung im Labormaßstab .....	58
In-Situ-Verfahren zur Bestimmung hoher Sauerstoffdefizite in Cer-Zirkon-Mischoxiden für den Einsatz in der Abgasnachbehandlung .....	62
HUNTORF2020: Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff.....	66
EWAZ: Energie- und Wasserspeicher Harz Entwicklung innovativer Ansätze zur Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen von Hochwasserschutz, Ressourcensicherung und Energiespeicherung .....	72
FLEK: Femtosekundenlaserlegieren von Elektrokatalysatoren .....	77
Nachhaltigkeitsbewertung von Power-to-Methan .....	80
4. Wissenstransfer in die Praxis .....	84
Batterie-Sicherheitscampus Deutschland – Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung .....	86
5. Anhang.....	88

**Anmerkung:** Aus Gründen einer besseren Allgemeinverständlichkeit wird im Folgenden häufig der Begriff „Energieerzeugung“ anstelle des thermodynamisch korrekten Begriffs „Energiewandlung“ verwendet.





# ENTWICKLUNG DER FORSCHUNGSAGENDA



## Entwicklung des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien 2018/19

Die Jahre 2018 und 2019 standen im Zeichen der Umsetzung der in den Vorjahren weiterentwickelten Forschungsstrategie des Zentrums und den damit einhergehenden organisatorischen Veränderungen.

Wie bereits im letzten Jahresbericht dargestellt, verfolgt das EST seine strategische Forschungsagenda anhand der zwei übergeordneten Leitthemen „Grundlagen der Methanisierung“ und „Kurzzeitstabilisierung der elektrischen Energienetze durch Batteriespeichersysteme“, die jeweils mit einzelnen Forschungsprojekten unterlegt sind.

Im Zuge der Weiterentwicklung der Forschungsstrategie an der TU Clausthal unterstützt die Hochschulleitung das vom EST federführend koordinierte Forschungsfeld „Nachhaltige Energiesysteme“ mit einer internen Projektförderung. So arbeiten im disziplinübergreifenden Forschungsverbundes „Katalytische und mikrobielle Methanisierung als Basis für die Entwicklung nachhaltiger Energiespeicher“ seit Anfang des Jahres 2019 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Instituten für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT), Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT), Erdöl- und Erdgastechnik (ITE) sowie Mathematik (IFM) im EST an grundlegenden Fragestellungen der katalytischen und der mikrobiellen Methanisierung, um regenerativ erzeugten Wasserstoff und sowie Kohlenstoffdioxid in Methan umzuwandeln und anschließend unter Tage z.B. in bereits bestehende Gasspeicher zu injizieren. Bereits im Antragstellungsprozess wiesen die externen Gutachter auf die Fülle grundlagenorientierter Fragestellungen in diesem Gebiet und damit das hohe Projektpotenzial hin, auch mit Einbindung weiterer externer Forschungspartner. So konnte bereits nach Abschluss der ersten Arbeitspakete des Vorhabens ein neues DFG-Projekt im Bereich der untertägigen Methanisierung erfolgreich eingeworben werden. Auf das Methanisierungsprojekt wird an anderer Stelle dieses Berichts inhaltlich näher eingegangen.

Die wachsende Bedeutung der sicherheitsorientierten Forschung sowohl an innovativen Hochenergie-/Hochleistungs-Energiespeicher-

systemen als auch an sog. „Second-Life-Batterien“ zeigte sich auch am deutlichen Ausbau der dazugehörigen wissenschaftlichen Infrastruktur. So konnten die gemeinsam mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI-FS) im Batterie- und Sensoriktestzentrum (BST) betriebenen Forschungsanlagen sowohl apparativ als auch räumlich deutlich erweitert werden. Durch die Nachnutzung eines vormals von der Leibniz-Universität Hannover in den Außenanlagen des EST betriebenen Teststandes verfügt das BST bspw. über deutlich erweiterte Kapazitäten für die Durchführung von Langzeituntersuchungen von Batteriezellen und -modulen, die bislang nur in einem begrenzten Maße durchgeführt werden konnten. Darüber hinaus verfügen die Forschungspartner seit kurzem über ein zweites Testzentrum im Gewerbegebiet Baßgeige, welches federführend vom HHI-FS betrieben wird. Das zusätzliche Testzentrum ermöglicht sowohl Einzel- als auch Reihenuntersuchungen an Hochleistungsbatteriesystemen mit Energiegehalten von mehr als 80 kWh, wie sie aufgrund von Kapazitätsengpässen sowie einer für kleinere Systeme ausgelegten Anlagenkonfiguration im bisherigen Batterietestzentrum nicht durchgeführt werden konnten. Mit seiner modularen und damit deutlich flexibleren Anlagenkonfiguration können zudem kundenspezifische Vorgaben an die Testprozeduren deutlich schneller, und damit letztlich auch kostengünstiger, durchgeführt werden.

Mit der bereits bestehenden und der im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekte „MoBat“ und „ReserveBatt“ deutlich erweiterten wissenschaftlichen Infrastruktur am Batterietestzentrum konnten verschiedenste neue Erkenntnisse beim Betrieb von Batterien in elektrischen und thermischen Grenzbereichen gewonnen werden. So zeigte sich beispielsweise, dass die Art der Auslösung eines sogenannten „Thermal Runaways“, also das Durchgehen einer Lithium-Ionen-Batterie, einen großen Einfluss auf den gesamten Reaktionsverlauf hat. Weiter zeigt eine Überladung andere Auswirkungen als ein Kurzschluss oder eine externe Erwärmung. Die Bearbeitung sich hieraus ergebender wissenschaftlich-technischer Fragestellungen (z.B.: Wie lassen sich Sta-



bilitätskriterien allgemein formulieren? Welche Gase werden zu welchen Zeitpunkten in welchen Mengen frei? Wie kann eine Havarie frühzeitig erkannt und verhindert werden?) führten u.a. zur Durchführung von zwei Studien im Auftrag des europäischen Automobilherstellerverbandes ACEA und zur Beantragung des neuen Verbundprojekts „RiskBatt“ im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramm des BMWi, welches voraussichtlich im zweiten Quartal 2020 beginnen wird.

Das ebenfalls in der Forschungsagenda des EST hervorgehobene Themengebiet „Sichere Nachnutzung von Second-Life-Batterien“ wurde anhand eines Eigenprojekts von EST und HHI-FS weiterentwickelt. Dazu wurde ein gemeinsames Demonstrationsprojekt durchgeführt, das Forschung und Entwicklungshilfe verbindet und zum Ziel hatte, die vergleichsweise kleinere Insel Kibumba am Südwestufer des Victoriasees mithilfe eines Inselnetzwerkes („Micro-Grid“) zu elektrifizieren. Hierzu wurden Lithium-Ionen-Batterien, die zuvor im Rahmen des mittlerweile abgeschlossenen Forschungsprojektes „BESIC“ zum Antrieb von Schwerlastwagen im Hamburger Hafen eingesetzt wurden, auf ihre Eignung und Zuverlässigkeit hinsichtlich einer „Second Life“-Nutzung charakterisiert und getestet. Die Batterien wurden anschließend mit einer eigens auf dem EnergieCampus Goslar entwickelten Sicherheits- und Monitoringsensorik versehen und mit einem ebenfalls eigenentwickelten Batterie-Managementsystem ausgestattet. In Kombination mit vor Ort installierten PV-Modulen stellt das Gesamtsystem insgesamt 75 Kilowattstunden Energie bereit; in der ersten Ausbaustufe des Vorhabens wurden zunächst die lokale Schule sowie eine Krankenstation elektrifiziert. Im Frühjahr 2020 werden zusätzlich Kühltru-

hen und eine Wasseraufbereitungsanlage auf der Insel installiert, um den Inselbewohnern mit der neuen Infrastruktur die Möglichkeit zu geben, ihre wirtschaftliche Zukunft z.B. durch kommerziellen Fischfang zu verbessern. Neben der Demonstration einer „Second Life“-Nutzung von ehemaligen Traktionsbatterien in einem „Reallabor“ ist es aus wissenschaftlicher Sicht in diesem Projekt besonders interessant zu sehen, wie die Batteriezellen auf ständige Hitze und hohe Luftfeuchtigkeit reagieren, um deren Alterungsverhalten unter klimatisch extremen Bedingungen zu analysieren, um so aus den vorliegenden Daten präzisere Vorhersagemodelle für „Second Life“-Anwendungen von Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln.

Im Bereich der Förderung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern rückt neben der Promotion im Rahmen eines Forschungsprojekts auch die wissenschaftlicher Weiterqualifizierung bereits promovierter „Post-Docs“ verstärkt in den Fokus. So wurde das EST organisatorisch neu in drei Forschungsfelder/Cluster „Systemintegration“, „Materialfunktionalisierung“ und „Energiewandlung und -speicherung“ aufgestellt, welche jeweils von einer/einem PostDoc, insbesondere mit Blick auf die Beantragung disziplinübergreifender Verbundanträge, koordiniert werden. Wesentliche Aufgabe der PostDocs ist der Aufbau und die verantwortliche Leitung einer eigenen Arbeitsgruppe im jeweiligen Cluster, um auf diese Weise auch die wissenschaftliche Sichtbarkeit des Zentrums in Bereichen mit ausgesprochen hoher eigener Forschungskompetenz weiter steigern zu können. Um die PostDocs bei ihren Arbeiten besser fördern zu können, werden die drei Arbeitsgruppen mit jeweils einer wissenschaftlichen Personalstelle aus dem Budget des EST zusätzlich unterstützt.

*Demonstrationsanlage für Second-Life-Batterien auf der Insel Kibumba, Tansania  
Foto: Springmann*





# GESCHÄFTSBERICHT UND INFRASTRUKTUR

2.

## Geschäftsbericht 2018/2019

Standen die Jahre 2016/17 im Wesentlichen im Zeichen der Neustrukturierung und Neuausrichtung der Energieforschung an der TU Clausthal, rückte in den vergangenen zwei Jahren die Umsetzung der weiterentwickelten Forschungsstrategie verstärkt in den Vordergrund. Aus organisatorischer Sicht wurde dieser zum einen in einer Umbenennung des bisherigen „Energie-Forschungszentrums der TU Clausthal“ in das „Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST)“ und zum anderen mit der Ausgliederung des Drilling Simulators Celle (DSC) als eigenständiges fünftes Forschungszentrum der TU Clausthal Rechnung getragen. Der DSC verfolgt seither seine Forschungsagenda im Bereich der Simulation und experimentellen Untersuchungen zur Erklärung und Prognose von Tiefbohrprozessen, beispielsweise für eine effizientere und damit kostengünstigere Nutzung der Geothermie, als „Drilling Simulator Celle – Deutsches Zentrum für Hochleistungsbohrtechnik und Automati-

sierung“. Inhaltlich stellt er auf die Weise auch eine Technologieplattform für die disziplinübergreifende Zusammenarbeit mit den vier weiteren Forschungszentren der TU Clausthal in diesem Forschungsbereich dar.

Entlang der bereits in der Einleitung skizzierten strategischen Leitprojekte des EST konnte im Bereichszeitraum mit der Bearbeitung zahlreicher neuer drittmittelfinanzierter Forschungsprojekte begonnen werden, mit denen insbesondere im Bereich der Batterieforschung auch die bestehende Infrastruktur im Batterie- und Sensoriktestzentrum (BST) deutlich ausgebaut werden konnte. Mit der Nachnutzung eines ehemals von der Leibniz-Universität Hannover betriebenen Prüfstandes als heutiges „Zelltestzentrum“ lassen sich Langzeit-Zyklisierungsuntersuchungen unter Standardbedingungen nunmehr auch unter Einhaltung einer konstanten Umgebungstemperatur durchführen, was bislang nicht möglich war. Die neue Prüfumge-



## Mitarbeiter der EST-Geschäftsstelle 2018/19:

### Leitung



Dr. Jens-Peter Springmann  
Administrativer Geschäftsführer

### Verwaltung



Fee Strahler



Heike  
Stucki-Bammel

### Bibliothek



Nadine  
Kleinander

### Haustechnik



Anika Röhrig

Andreas Bierwirth

bung eignet sich auch für den Aufbau von kleineren Abusekammern zu deutlich geringerem Aufwand als bisher, um z.B. Kalorimeter-Messungen zur Materialcharakterisierung von Zellen durchführen zu können. Die zunehmende Sichtbarkeit und Attraktivität der gemeinsam mit der Abteilung Faseroptische Sensorsysteme des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts auf dem EnergieCampus Goslar betriebenen Versuchsanlagen des BST für industrielle Kunden zeigte sich im Berichtszeitraum in einem stetig wachsenden Interesse an experimentellen Untersuchungen und Studien im Themenfeld Batteriesicherheit. Hierzu trugen u.a. auch die Aktivitäten mit der regionalen Wirtschaftsförderung unter dem Dach des „Batterie-Sicherheitscampus Deutschland“ entscheidend bei.

Auch in den Jahren 2018 und 2019 verfügte das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien auf Basis der mit Präsidium geschlossenen Zielvereinbarung über einen jährlichen Etat aus Haushaltsmitteln von rund 1,50 Millionen Euro für Personal- und Sachmittel. Dieser konnte im Berichtszeitraum durch budgetwirksame einge-



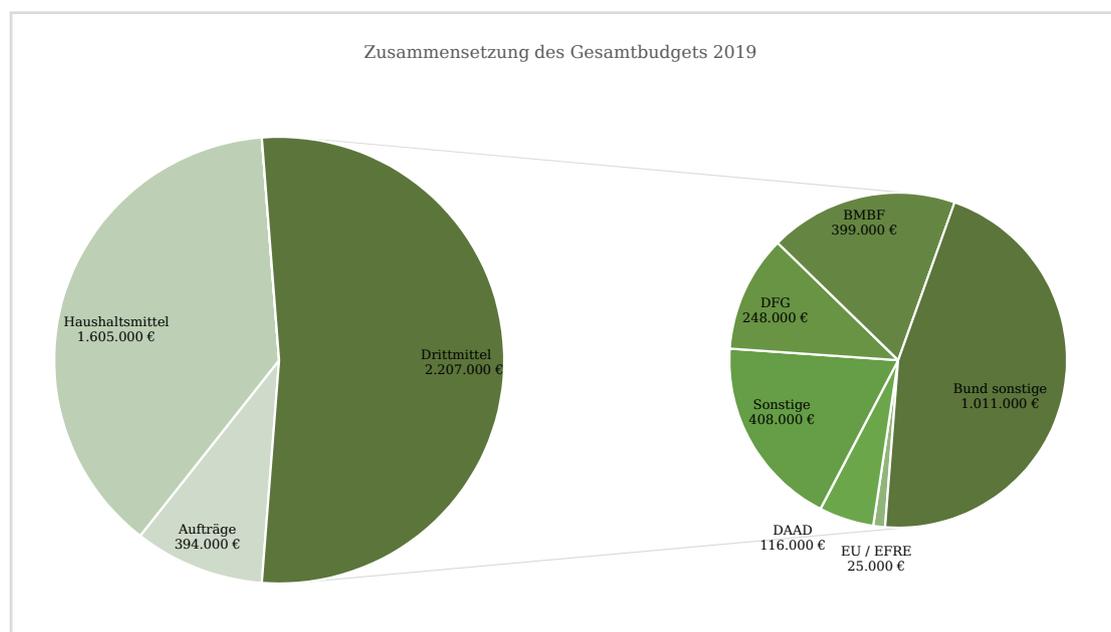


worbene Drittmittelerträge im jeweiligen Jahr mehr als verdoppelt werden. Die Abbildungen zeigen die Zusammensetzung der Jahresbudgets in den Jahren 2018 und 2019 auf.

Aufgrund der bereits erwähnten Ausgliederung des Drilling Simulators Celle zu Beginn des Jahres 2018 sowie dem parallelen Ausbau der Energieforschungsaktivitäten am CUTEC-Forschungszentrum der TU Clausthal ging das

Gesamtbudget des EST in diesem Jahr zunächst um gut 27 Prozent gegenüber dem Vorjahr auf insgesamt 3,79 Millionen Euro zurück. Mit den seither der neuen Forschungsagenda folgenden Drittmittelprojekten konnte es im Folgejahr wieder gesteigert werden, auf eine Gesamthöhe von knapp 4,21 Millionen Euro.

Der Personalbestand blieb im Berichtszeitraum nahezu unverändert: Im Durchschnitt waren





1. ALIQUAM INTERDUM VITAE DEAM SED HENDRERAT. VIVAMUS UT FEUGIAT LOREM  
 A MALESUADA ENIM. MAURIS BIRONCUS, ORCI UT TEMPUS CURSUS, LOREM ELIT  
 IACULIS ARCU, SAGITTIS SUSCIPIT EUI URNA MOLESTIE NEQUE. QUISQUE  
 FAUCIBUS ORNARI ALIQUA ALIQUET PORTTITOR. NUNC ID VEHICULA TELLUS, EU  
 PELLENTESQUE RISUS, SED VITAE DOLOR NEC NISI PORTA ELEMENTUM.  
 CURABITUR TELLUS ERAT VARIUS SED VENENATIS QVIS, ALIQUAM SIT AMET  
 ARCU, FUSCE POSUERE MI OIAM, NEC EGESTAS LACUS CONGUE ID.

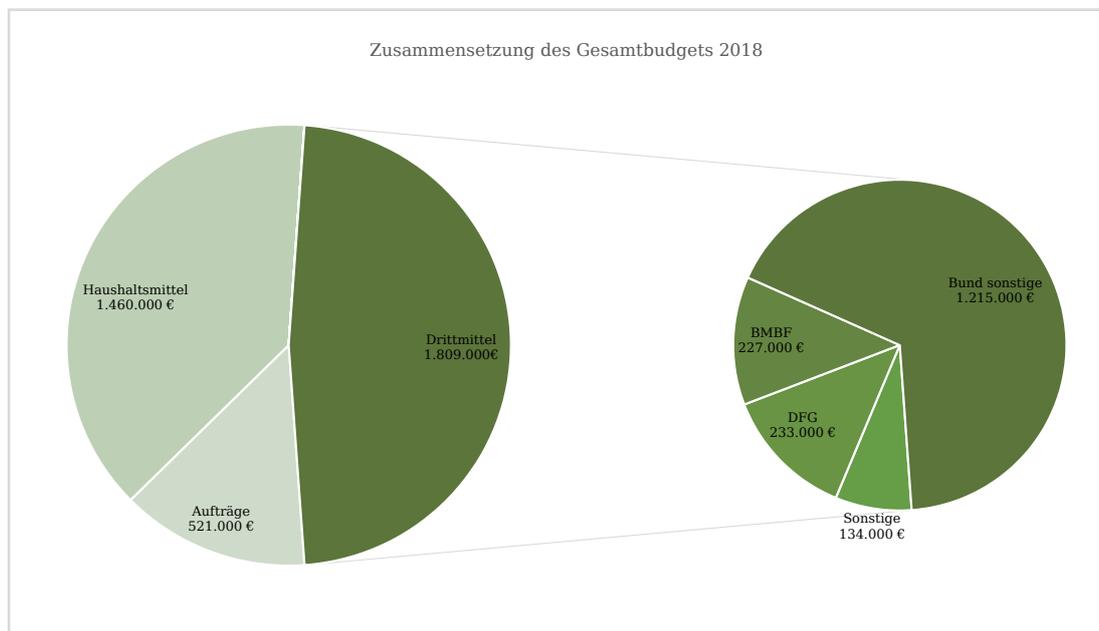
2. DUIS VENENATIS, EU CONGUE ARCU ULTRICES, UT CONVALLIS NEQUE VIVERRA.  
 SED VEL URNA CONGUE, POSUERE ERAT EU, VARIUS RISUS, PELLENTESQUE  
 FAUCIBUS PURUS IPSUM, SIT AMET VESTIBULUM ORCI FERMENTUM CONMOO.  
 IN TEMPUS LOREM NEC QDIO TINCIDUNT BLANDIT, SED AT ORNARE NULLA.

3. PELLENTESQUE CONDIMENTUM NUNC EU ORCI AUCTOR, NEC IACULIS URNA  
 PORTTITOR, FUSCE SED FACILISSIS ODIO, VESTIBULUM EGESTAS IPSUM, DUIS AC  
 MASSA QDAM, VIVAMUS NON CONSEQUAT PURUS, AT MALESUADA MAURIS,  
 LOREM IPSUM DOLOR SIT AMET, CONSECTETUR ADIPESCIUNG ELIT, CURABITUR  
 MATTIS VEL VELIT EGET SUSCIPIT, MAECENAS MOLLIS EU RISUS UT CONSEQUAT.  
 NAM SUSCIPIT MAURIS ERAT, ET ELEEFENDI MI SODALES EU, ANEAN ACCUSAN  
 IMPERDIET TORTOR NON PLACERAT, PROIN EU NUNC NISI.

am EST im Jahr 2019 insgesamt 43 Vollzeitstellen besetzt, davon 37 Stellen im wissenschaftlichen Bereich und sechs Stellen im nicht-wissenschaftlichen Bereich.

Die Budgetentwicklung seit 2018 bildet sowohl in der Höhe als auch in der Struktur bereits das weiterentwickelte Forschungsprogramm des EST ab: Dieses wird sich in der wissenschaftlichen Forschung in den kommenden Jahren

noch deutlich stärker als bisher grundlagenorientierten Fragestellungen widmen. Im Bereich der anwendungsorientierten Forschung rücken immer stärker Fragestellungen eines sicheren und zuverlässigen Betriebs von Hochleistungs-/Hochenergiespeichern und dazugehörigen Komponenten sowie deren Verhalten im Energiesystem in das Zentrum der Untersuchungen.



[Anmerk. 2019, vorläufig]





# STRATEGIEBILDENDE FORSCHUNGSPROJEKTE IN DEN JAHREN 2018/2019

3.

# CliMb: Katalytische und mikrobielle Methanisierung als Basis für eine nachhaltige Energiespeicherung

## Kurzfassung

Mit dem wachsenden Anteil fluktuierender regenerativer Energie, insbesondere aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen, werden Energiespeicher zur Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität und -sicherheit in Deutschland immer mehr an Bedeutung gewinnen. In diesem Kontext wird insbesondere eine effiziente Wasserstoffnutzung eine wichtige Rolle einnehmen. Die Methoden der katalytischen und der mikrobiellen Methanisierung stellen vielversprechende Ansätze dar, um regenerativ erzeugten Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid in Methan umzuwandeln und anschließend in untertägigen Formationen, z.B. in bereits bestehenden Gasspeichern, zu lagern. Im Projekt werden daher die Grundlagen beider Umwandlungsprozesse anhand von Experimenten in Verbindung mit numerischer Modellierung und Simulation untersucht, um deren technische Herausforderungen und die jeweiligen Energiebilanzen zu vergleichen.

## Abstract

With the growing share of fluctuating renewable energy sources – especially from photovoltaic and wind farms – energy storage for securing constant energy supply will become more important in Germany. In this context, efficient use of hydrogen will play an impor-

tant role. Catalytic and microbial methanation are promising solutions to transform hydrogen, as a product from electrolysis, and carbon dioxide to methane. The produced methane can be stored directly in the underground bioreactor or can be injected after the catalytic methanation in existing storage facilities. Both processes are investigated in this project, giving way for performance comparisons. To investigate the feasibility of both transformation processes, experimental studies are coupled with numerical modeling and simulations in a multi-scale approach.

## Verbundprojekt CliMb

Die Entwicklung von erneuerbaren Energien, zur Reduzierung des Anteils von Kernenergie und fossilen Brennstoffen am Energiemarkt, ist ein wesentlicher Teil der Energiewende. Durch die Fluktuation der Energieproduktion aus Solar- und Windkraftanlagen, bedingt durch die sich ändernde Wetterlage, ist die effiziente Nutzung der gewonnenen Energie eine besondere Herausforderung. Um in Deutschland eine konstante Energieversorgung zu gewährleisten, ist daher ein langfristiges und kurzfristiges Energiespeicherkonzept notwendig.

Ein Ansatz für diese Problematik ist der Aufbau einer effizienten Wasserstoffnutzung. Vielversprechende Möglichkeiten, um Wasserstoff, produziert durch Elektrolyse unter Verwendung der erneuerbaren Energien, und Kohlenstoffdioxid in Methan umzuwandeln, sind die katalytische und mikrobielle Methanisierung. Das durch diese Prozesse erzeugte Methan könnte direkt in untertägigen Bioreaktoren gespeichert werden, oder folgend in bereits bestehende Speicher injiziert werden. Methan hat im Vergleich zum Wasserstoff einen hohen Brennwert und die Infrastruktur für den Transport ist in Deutschland stark ausgebaut.

In dem Projekt „Catalytic and microbial methanation as basis for sustainable energy storage“ werden beide Umwandlungsprozesse grundlegend untersucht, um deren technische Her-

### Projektforschungsstellen und Verbundpartner

- Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (Prof. Dr. Turek, Prof. Dr. Wehinger)
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (Prof. Dr. Schade)
- Institut für Erdöl- und Erdgastechnik (Prof. Dr. Ganzer)
- Institut für Mathematik (Prof. Dr. Ippisch)

ausforderungen und energetische Bilanzen zu vergleichen.

## Forschungsüberblick

Übergeordnet wollen die Wissenschaftler die katalytische und untertägige Methanisierung grundlegend erforschen. Die Untersuchungen sollen aufzeigen, wo technische Herausforderungen und Limitierungen für beide Prozesse bestehen. Um solch ein Verständnis aufzubauen, werden beide Prozesse experimentell und mit Hilfe von numerischer Modellierung und Simulation untersucht.

Die experimentellen Studien sind dabei in die beiden Prozesse unterteilt. Zum einen ist das die Untersuchung der katalytischen Methanisierung durch Nickel-Katalysatoren, in der die Wandtemperaturen, Katalysatorpartikelgrößen und deren Geometrien variiert werden. Zum anderen wird die untertägige Methanisierung in Mikromodellen, welche das poröse Medium repräsentieren, experimentell untersucht und das mikrobielle Wachstum/Verhalten unter dynamischen und statischen Bedingungen betrachtet.

Zur Verbesserung der Interpretation und Quantifizierung der experimentellen Ergebnisse ist die Entwicklung von In-Situ-Sensoren für beide

Bereiche der Experimente geplant. Mit den gewonnenen Daten sollen für beide Möglichkeiten der Methanisierung numerische Modelle und Simulationen auf verschiedenen Skalen (Poren-Skala bis Kontinuum-Skala) durchgeführt werden. Dabei dienen die Experimente zur Validierung der Modelle, mit welchen der Methanisierungsprozess durch ein tiefer gehendes Verständnis optimiert werden kann.

## Projektstruktur

Insgesamt ist das Projekt in fünf Teilprojekte (TP) gegliedert (siehe Abbildung 1). Sprecher des Gesamtprojektes und Leiter des experimentellen Teils der Untergrundmethanisierung ist Prof. Ganzer (Institut für Erdöl- und Erdgastechnik). Der experimentelle Teil der katalytischen Methanisierung wird von Prof. Turek (Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik) geleitet und von Prof. Wehinger (Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik) durch Multi-Skalen-Modellierung und Simulationen unterstützt. Die Modellierung und numerische Simulation wird für die Untergrund-Methanisierung durch die Arbeitsgruppe von Prof. Ippisch (Institut für Mathematik) durchgeführt. Die Entwicklung der In-Situ-Sensorik, als letztes Teilprojekt, wird von Prof. Schade (Institut für Energieforschung und Physikalische Technologie) geleitet.

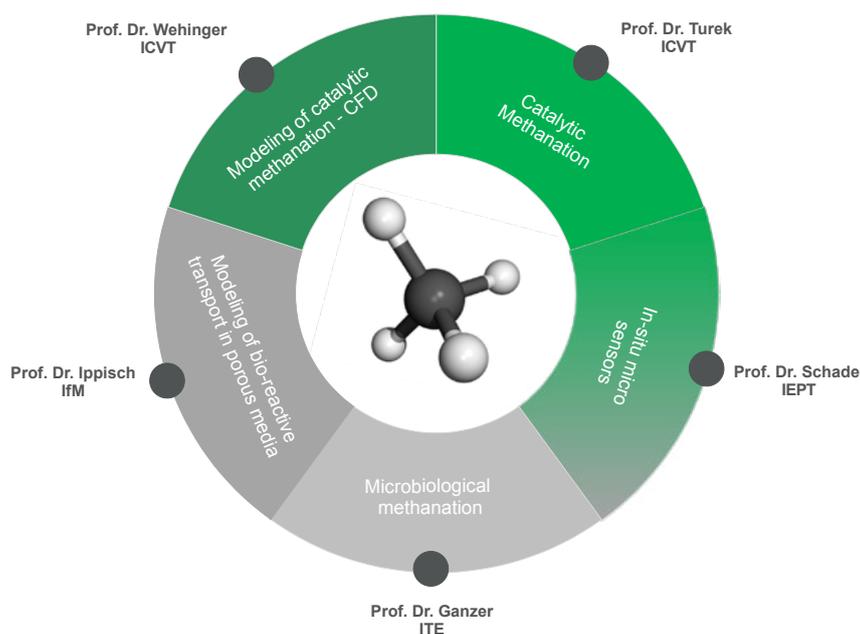


Abbildung 1: Projektstruktur des Verbundprojektes CLiMb

### Untergrundmethanisierung (TP1)

Das Institut für Erdöl- und Erdgastechnik untersucht das grundlegende mikrobielle Verhalten in porösen Strukturen, um Risiken und Potenzial des Methanisierungsprozesses abschätzen zu können. Dabei wurde zunächst das mikrobiologische Wachstum von Methanbildnern (methanogene Archaeen) in Batch-Experimenten angeregt, um ein funktionierendes Populationswachstum als Grundlage zu gewährleisten und die mikroskopische Analytik zu testen. Proben der mikrobiellen Populationen aus den Batch-Experimenten wurden in regelmäßigen Zeitabständen in ein Mikromodell injiziert und analysiert. Die ersten Bild- und Druckauswertungen zeigen ein starkes Wachstum innerhalb der ersten Tage, zu sehen in Abbildung 2. Um das Wachstum zusätzlich zu fördern, wurde jeden Tag der Nährstoff in Form eines Wasserstoff/Kohlenstoffdioxid-Gemischs erneuert. Eine Biofilmbildung konnte zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beobachtet werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Mikroben primär in einem Flaschenreaktor wuchsen und erst nachträglich in die poröse Struktur injiziert wurden.

Im nächsten Schritt wird das Wachstum direkt im Mikromodell unter statischen Bedingungen

vollzogen. Um mikrobielles Wachstum in teilgesättigten porösen Strukturen experimentell untersuchen zu können, wird der Wachstumsprozess in einem Glas-Silizium-Glas-Mikrochip, welcher die poröse Struktur repräsentiert, untersucht (siehe Abbildung 3). Die Mikrofluidikexperimente erlauben hierbei eine direkte Visualisierung der Mikroben und ihres Verhaltens.

Folgend wird das Populationsverhalten bei konstantem Gasdurchfluss (dynamisch) untersucht. Diese unterschiedlichen Analysen können limitierende Wachstumsparameter aufzeigen und zugleich lassen sich zugehörige Wachstumsraten, Sterberaten und andere wachstumsbeschreibende Koeffizienten berechnen. Basierend auf den Erkenntnissen und Parametern wird zusammen mit der Gruppe des Teilprojektes 2 ein numerisches Modell entwickelt.

### Multi-Skalen-Simulation von mikrobieller Methanisierung in porösen Medien (TP2)

Das Teilprojekt am Institut für Mathematik befasst sich mit der numerischen Modellierung und Simulation. Die Umwandlung des Wasserstoffs ist dabei ein Multi-Skalen-Pro-

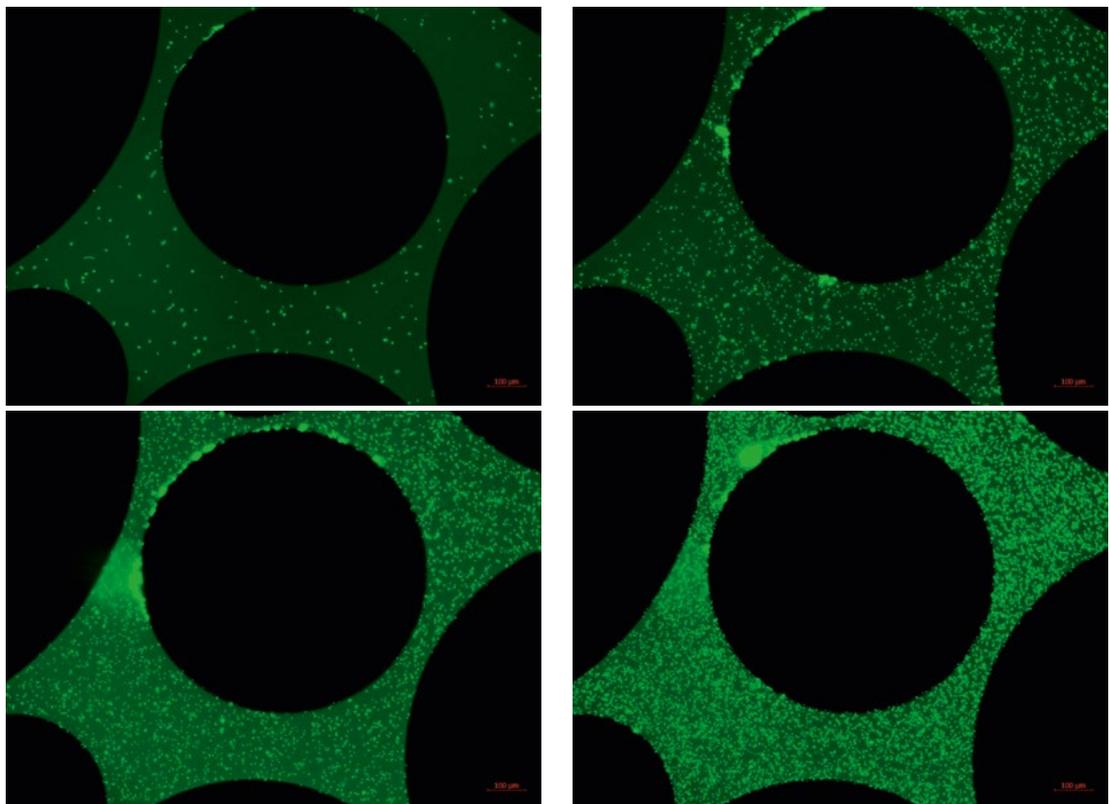


Abbildung 2: Wachstum der methanogenen Archaeen aufgenommen in einem Mikromodell; grün = Mikroben, schwarz = Siliziumkörner

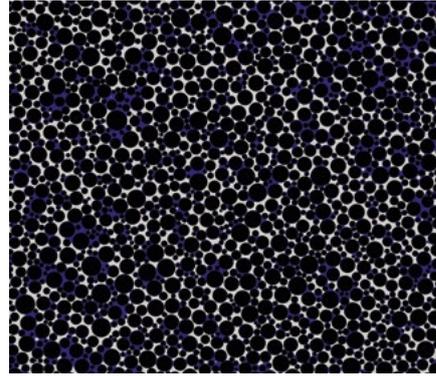


Abbildung 3: links: Struktur eines Glas-Silizium-Glas Mikromodell [1]; rechts: Mit zwei Phasen gesättigtes Mikromodell, braun = gasförmige Phase, grün = wässrige Phase

blem. Der Hauptteil des Prozesses findet auf der Porenskala statt. Daher wird zunächst ein Porenmodell definiert. Neben dem mikrobiellen Metabolismus, welcher durch die Michaelis-Menten-Kinetik beschrieben werden kann, wird besonderer Fokus auf den Phasenaustausch zwischen wässriger und gasförmiger Phase gelegt. Zunächst wird basierend auf einem bestehenden Modell der Fluss der gasförmigen Phase mit der Stokes-Gleichung modelliert. Dabei wird angenommen, dass die initiale Verteilung der Phasen im Mikromodell aus Teilprojekt 1 bekannt ist. Der Transport der einzelnen Komponenten in den Phasen wird durch eine Konvektions-Diffusions-Gleichung beschrieben. Um das beschriebene Modell zu simulieren, wird eine räumliche und zeitliche Diskretisierung vorgenommen. Für die räumliche Diskretisierung wird die „cell-centered Finite-Volumen-Methode“ verwendet und für die zeitliche ein diagonal impliziertes Runge-Kutta-Verfahren. Folgend wird das Porenskalmodell mit den experimentellen Daten aus Teilprojekt 1 validiert. Nach der Validierung des Poren-Skala-Modelles wird das Modell für die Kontinuumskala entwickelt.

### In-Situ-Mikrosensorik (TP3)

Das Teilprojekt befasst sich mit der Entwicklung von Fluidstrukturen und In-Situ-Sensorik, die in den experimentellen Teilprojekten verwendet werden sollen. Die verbesserte Auswertung durch die Sensorik wird für die Modellierung der Prozesse benötigt.

Die erste Aufgabe dieses Teilprojekts war die Herstellung von Fluidstrukturen mittels Laserdirekt schreiben. Dafür wurde ein Fotopolymer auf

ein Glassubstrat aufgebracht, das anschließend mit einem Laser strukturiert wurde. Folgend wurde das Material durch die Belichtung mit UV-Licht aktiviert. Belichtete Stellen polymerisieren im anschließenden Heizschritt. Unbelichtete Stellen werden im nachfolgenden Entwicklungsschritt abgewaschen. Übrig bleiben kleine ca. 25 µm hohe Zylinder mit unterschiedlichen Durchmessern und Abständen zueinander.

Um diese Strukturen für die vorgesehenen Versuche verwenden zu können, müssen diese mit einem Glasdeckel geschlossen werden. Die Herausforderung dabei ist, dass der Glasdeckel mit dem unteren Teil abdichtet und, dass zwischen den einzelnen Säulen und dem Deckel kein Spalt bestehen bleibt.

Für diese Aufgabe wurde eine Presse (siehe Abbildung 4) konstruiert und hergestellt. Diese besteht aus mehreren schweren Metallplatten, die über eine hydraulische Pumpe zusammengepresst werden. Des Weiteren verfügt die Presse über zwei Heizplatten, sodass die Probe, während sie gepresst wird, auf die notwendige Temperatur gebracht werden kann, um zu polymerisieren.

Für das eigentliche Verkleben wird der Glasdeckel ebenfalls mit einer dünnen Schicht von Fotopolymer beschichtet. Dieser wird dann im Gegensatz zum „Boden“ ganzflächig mit UV-Strahlung belichtet. Dadurch wird die ganze Schicht aktiviert. Die eigentliche Polymerisation erfolgt danach direkt in der Presse, indem die Probe auf 120°C geheizt wird und die zuvor mit UV-Licht aktivierte Schicht polymerisiert und sich dabei mit den kleinen Zylindern der Strukturschicht verbindet.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

CLiMb: Katalytische und mikrobielle Methanisierung als Basis für eine nachhaltige Energiespeicherung

### Förderzeitraum:

01.01.2019 – 31.12.2021

### Ausführende Stelle:

Technische Universität Clausthal - Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik, Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, Institut für Mathematik - Clausthal-Zellerfeld, Niedersachsen

### Fördermittelgeber:

Technische Universität Clausthal, Forschungszentrum Energiespeichertechnologien

### Projektstatus:

Projekt in Bearbeitung

### Projektleiter:

Prof. Dr. Leonhard Ganzer

### Projektkoordinator:

Gion Strobel, M.Sc.

E-Mail: gion.joel.strobel@tu-clausthal.de



Leonhard Ganzer



Gion Strobel

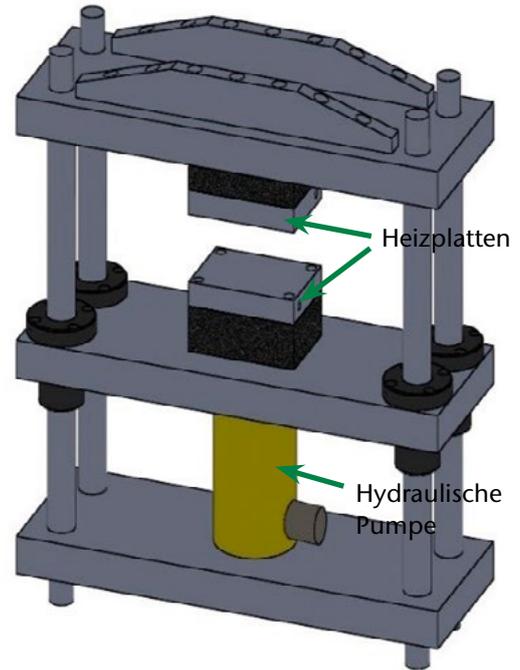


Abbildung 4: CAD-Modell der Presse für das Verkleben der Fluidstrukturen

Eine weitere Aufgabe dieses Teilprojekts ist die Herstellung von Sensoren in der gefertigten Fluidstruktur wie beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt. Dazu konnten erstmals FBG-Strukturen (Fiber-Bragg-Gitter) mittels Femtosekunden-Laser in einen integrierten Polymerwellenleiter geschrieben werden. Mit den FBG-Strukturen im Wellenleiter können minimale Brechzahl oder auch Temperaturunterschiede gemessen werden. Der nächste Schritt ist das Integrieren der Wellenleiter mit den eingeschriebenen FBGs in die Fluidstruktur.

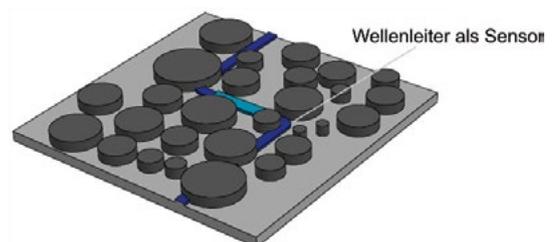


Abbildung 5: Aufbau der Fluidstrukturen mit Sensorik



Abbildung 6: Aufbau des Profilreaktors zur Messung axialer Temperatur- und Konzentrationsprofile.

### Katalytische Methanisierung (TP4)

Der experimentelle Teil der katalytischen Methanisierung untersucht die katalytische Umwandlung von Wasserstoff in einem Mikrofestbettreaktor. Dabei stellt die Exothermie der Reaktion eine entscheidende Herausforderung dar. Diese führt zu einer starken Hotspot-Ausbildung in den in der Regel verwendeten Festbettreaktoren. Dadurch kann es zum Sintern der porösen Katalysatoren kommen, wodurch die Aktivität reduziert wird. Des Weiteren wird der erreichbare Umsatz der Reaktion durch eine Temperaturerhöhung aus thermodynamischen Gründen verschlechtert. Für die experimentellen Untersuchungen wird daher ein Profilre-

aktor verwendet, dieser ist in Abbildung 6 zu erkennen.

Mit Hilfe dieses Systems können, mit einer Auflösung im Mikrometerbereich, axiale Temperatur- und Konzentrationsprofile aufgenommen werden. Die erkennbare Kapillare verläuft in axialer Richtung durch die Katalysatorschüttung. Mit dieser wird kontinuierlich ein Teilstrom der Gasmischung entnommen, durch Verfahren des Schlittens wird somit nacheinander an jeder Position der Katalysatorschüttung eine Probe entnommen. Die Gaszusammensetzung wird mit Hilfe eines Gaschromatographen analysiert. Des Weiteren wird mit Hilfe eines Thermoelements, das zusätzlich in die Kapillare

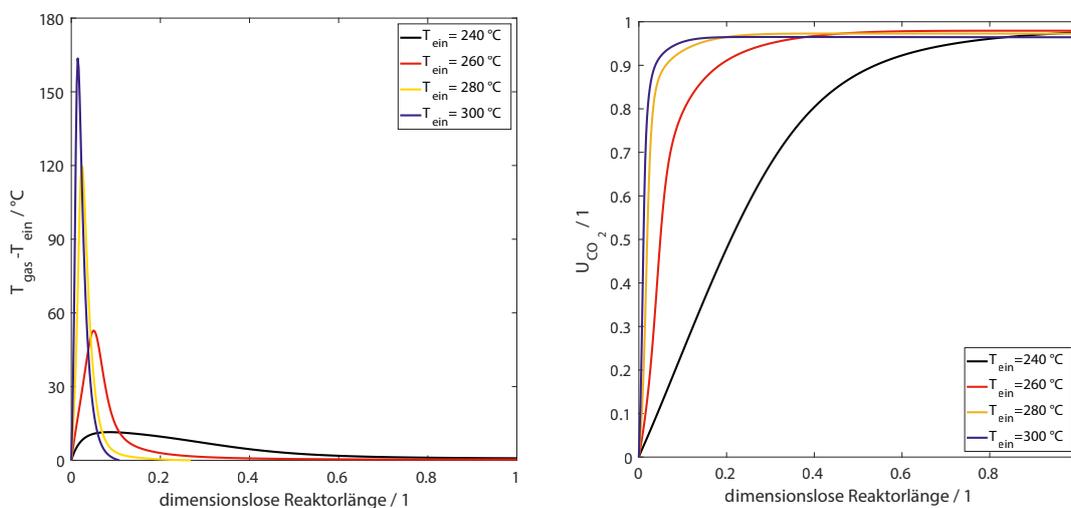


Abbildung 7: Temperatur- und Umsatzverläufe bei unterschiedlichen Eingangstemperaturen bei einem Druck von 10 bar, stöchiometrischer Eduktzusammensetzung und einer Gas Hourly Space Velocity (GHSV) von  $3600 \text{ h}^{-1}$

geführt wird, kontinuierlich die Temperatur der Gasmischung aufgenommen.

Für die eindimensionale Simulation wird ein heterogenes Modell verwendet. Dies bedeutet, dass der Katalysator und die Gasphase separat diskretisiert werden. Zur Vereinfachung werden unter anderem Kolbenströmung und eine einheitliche Porosität der Schüttung verwendet. Beispielhafte Simulationsergebnisse unter Variation der Eingangstemperatur sind in Abbildung 7 dargestellt.

Es ist ein sensitives Verhalten der Gastemperatur ab einer Eintrittstemperatur von 260 °C erkennbar, dieses bewirkt eine Temperaturerhöhung im Hotspot von circa 160 °C. Dieser Temperaturanstieg führt zu einem schnelleren Umsatzanstieg im vorderen Bereich der Katalysatorschüttung. Diese Modelle sollen in den folgenden Arbeiten durch Messungen mit dem zuvor beschriebenen Messaufbau validiert werden.

### Mehrskalen-Simulation der katalytischen Methanisierung (TP5)

In Kooperation mit dem experimentellen Teilprojekt der katalytischen Methanisierung soll auch ein dreidimensional aufgelöstes Simulationsmodell erstellt werden, welches die experimentellen Ergebnisse wiedergeben kann.

Aufgrund des kleinen Verhältnisses von Reaktordurchmesser zu Partikeldurchmesser gibt es einen großen Einfluss der Wand auf die Struktur des Festbettes. Da somit die Porosität des Reaktors, anders als bei dem heterogenen Modell, stark positionsabhängig ist und nicht mit nur einem Wert beschrieben werden kann, wird für die Modellierung eine partikel aufgelöste CFD-

Simulation verwendet, schematisch dargestellt in Abbildung 8.

Des Weiteren wird auch das Strömungsprofil lokal aufgelöst. Dafür wird synthetisch ein Festbett erzeugt, welches als Geometrie dient und in welchem alle Partikel dreidimensional wiedergegeben werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine genauere Betrachtung der Strömungs- und Temperatureffekte. Mit einem funktionierenden Modell kann der Einsatz verschiedener Geometrien getestet werden. Dabei stellt eine der Herausforderungen die synthetische Festbettezeugung dar, welche eine möglichst realitätsnahe Geometrie liefern muss. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass mit Hilfe einer Open-Source-Software solche Betten mit erheblicher Zeitersparnis gegenüber üblichen Methoden generiert werden können [2]. In den nächsten Schritten soll die Methanisierungsreaktion in die Simulation integriert werden. Da der Katalysator selbst porös ist und eine feine Porenstruktur mit Hilfe der CFD nicht aufgelöst werden kann, muss auf eine modellhafte Beschreibung des Mediums zurückgegriffen werden. Dafür sollen innerhalb der Simulation verschiedene Diffusionsmodelle miteinander verglichen werden.

### Referenzen

- [1] Wegner, J.; Ganzer, L. Rock-on-a-Chip Devices for High p, T Conditions and Wettability Control for the Screening of EOR Chemicals. *SPE Europec featured at 79th EAGE. Conference and Exhibition - Paris, 2017*
- [2] Fleischlen, S.; Wehinger, G.D. Synthetic Packed-Bed Generation for CFD Simulations: Blender vs. STAR-CCM+. *ChemEngineering 2019*, 3, 52.

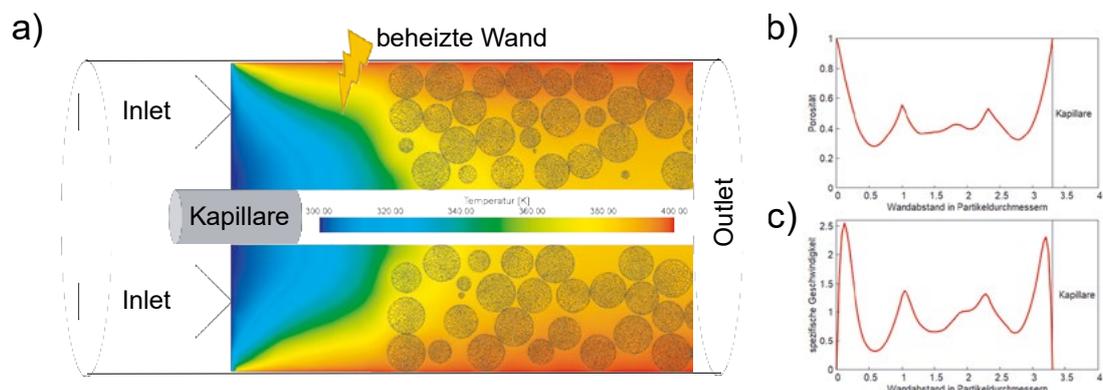


Abbildung 8: a) Partikel aufgelöste CFD-Simulation des Profilreaktors mit beheizter Wand b) Porositätsprofil in radialer Richtung c) Strömungsprofil in radialer Richtung.

# HyINTEGER: Untersuchungen zur Integrität von Bohrungen und technischen Materialien in geologischen H<sub>2</sub>-Untergrundreservoirs

## Kurzfassung

Im Projekt H2STORE fanden Wissenschaftler heraus, dass Wasserstoff unter spezifischen Bedingungen Gesteinsveränderungen hervorrufen kann. Allerdings kann das Gas auch in anderen Materialien, wie z.B. Stahllegierungen, Alterationen verursachen. Daher untersuchten die Forscher im Folgeprojekt HyINTEGER nun das Zusammenspiel zwischen Wasserstoff, technischen Komponenten und den natürlichen Reservoir-Bestandteilen. Die Untersuchungen sollen 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 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 investigated the interactions between the hydrogen, components of technical installations and rocks in the near wellbore area. This research revealed possible issues and facilitates 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 bewirken kann. Auch in anderen Materialien, wie beispielsweise Stahl, Bohrlochzement und Elastomerdichtungen, kann es möglicherweise Alterationen hervorrufen. Daher untersuchten die Forscher in HyINTEGER die Interaktion zwischen den technischen

Komponenten und den natürlichen Reservoir-Bestandteilen (Gesteinen und Porenflüide) unter Druck- und Temperaturbedingungen in wasserstoffführenden Umgebungen. Hierzu wurden Laborexperimente unter standortspezifischen Bedingungen mit verschiedenen Gasphasen (H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) durchgeführt. Dabei wurden unter anderem mineralogisch-chemische, petrophysikalische und mikrobiologische Parameter betrachtet und deren Einfluss etwa auf die Reservoir-Eigenschaften, die Sicherheit (Dichtigkeit) der Speicher und den Fluidfluss im Reservoir und entlang der Bohrlöcher evaluiert. Dies soll eine Abschätzung von Leckagerisiken bei zyklischen Wasserstoffein- und ausspeisun-

### 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

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

gen und der Integrität von Bohrungen und Speichern ermöglichen.

### Forschungsfokus

Übergeordnet haben die Forscher untersucht, inwieweit eine Wasserstoffspeicherung in unterirdischen geologischen Porenreservoirs möglich ist, um eine längerfristige Speicherung von Energie zu ermöglichen. Eine solche Beurteilung setzt voraus, dass der eingespeiste Wasserstoff bzw. wasserstoffführende Gasphasen u. a.

- sicher, d. h. ohne unkontrollierten Austritt zur Oberfläche, also ohne Leckagerisiko und damit ohne Umweltschädigungen, eingelagert werden können,
- die Rückförderungsraten ökonomisch darstellbar sind
- diese Reservoirs über längere Zeiträume, d.h. über mehrere Ein- und Ausspeisezyklen hinweg unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten betrieben werden können.

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

### Projektarbeiten im Detail

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

1. Probenselektion bei projektunterstützenden Industriepartnern vor Ort: Dieses Probenmaterial umfasst neben Bohrkernmaterial auch Teile der Bohrlochverrohrung und -versiegelung, wie Stahllegierungen, Bohrlochzemente und Elastomerverbindungen.
2. Bau von Versuchseinrichtungen (Autoklaven) und Umbau von Laborräumen, um die (sicherheitstechnischen) Anforderungen zur Durchführung der geplanten Experimente zu gewährleisten.
3. Herstellung von Verbundproben aus den in 1. genannten verschiedenen Materialkomponenten für die durchgeführten Versuche.
4. Mineralogische, chemische, mikrobiologische, physikalische und petrophysikalische Charakterisierung des Probenmaterials, wobei Proben, die in Laborexperimenten genutzt wurden (s. nächsten Punkt), besonders detailliert untersucht wurden.

5. Durchführung von Laborexperimenten mit Schwerpunkt der 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 sind unter den druck- und temperaturspezifischen Bedingungen der Speicherstandorte mit verschiedenen Gasphasen (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>) und standortspezifischen Formationsfluidzusammensetzungen durchgeführt worden.
6. Untersuchung des Probenmaterials (an identischen Proben und mit gleichen Analysemethoden), welches in den Versuchen verwendet wurde und Interpretation der Datensätze hinsichtlich möglicherweise stattgefundenener Reaktionen; als Bezugspunkt dienen hier die in Punkt 4. erhobenen Daten. Weitergabe dieser Informationen und Daten an die betroffenen Arbeitsgruppen für deren numerische Simulationen.
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) 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 (z. B. Minerallösung, Materialversprödung, Korrosion) der Bohrlochkomponenten hinsichtlich der Sicherheit/Dichtigkeit von Wasserstoffspeichern (Abschätzung eines Leckagerisikos entlang des Bohrloches).

### Teilvorhaben 2

Im Teilvorhaben TP 2 der Technischen Universität Clausthal sind petrophysikalische Untersuchungen und Hochdruck-Hochtemperatur (HPHT)-Experimente zu den Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff, Reservoir-Gestein, Verrohrung und Zement von Untergrundspeicher-Bohrungen durchgeführt worden. Dazu wurde das zu testende Material in-situ Druck-



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

und Temperaturbedingungen ausgesetzt. Die an den Test-Proben vorgenommenen Untersuchungen haben die durch geochemische Wechselwirkungen hervorgerufenen Änderungen der petrophysikalischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien aufgezeigt. Die Untersuchungen machen Aussagen über die Eignung der geprüften Materialien für die Verwendung unter den bei Wasserstoffspeicherung herrschenden Einsatzbedingungen möglich.

### Aufbau der Versuchsanlagen

Die Aufrüstung der Laboratorien für Wasserstoffanwendungen erforderte vor allem sicherheitstechnische Anpassungen der bestehenden Messeinrichtung. Autoklaven für H<sub>2</sub>-Experimente sind, unter Aspekten der notwendigen

Sicherheit, gebaut worden, um die für die Langzeitversuche erforderlichen Anforderungen und Kapazitäten zu gewährleisten (siehe Abbildung 1 und 4).

### Herstellung von Probekörpern

Die Verbundzementproben repräsentieren den Verbund der Futterrohtour einer UGS-Bohrung mit dem Verbundzement, Deck- und Reservoirgestein (siehe Abbildung 2). Von besonderem Interesse war hierbei die Herstellung repräsentativer Verbundprobekörpern, also Proben, die aus Zement und Gestein bzw. Stahl und Zement zusammengesetzt sind. Daneben sind auch reine Zementplugs hergestellt worden.

### Charakterisierung der Proben vor den Autoklavenexperimenten

Die Charakterisierung beinhaltet die Bestimmung der Porosität, Durchlässigkeit und Dichte (siehe Abbildung 3). Dies ist an den Proben jeweils vor und nach den Autoklavenexperimenten durchgeführt worden, um die Proben auf, durch die Behandlung im Autoklav verursachte, Veränderungen zu untersuchen.

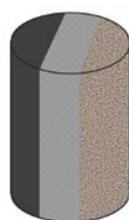
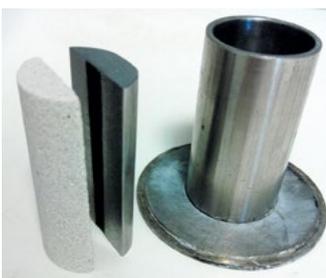
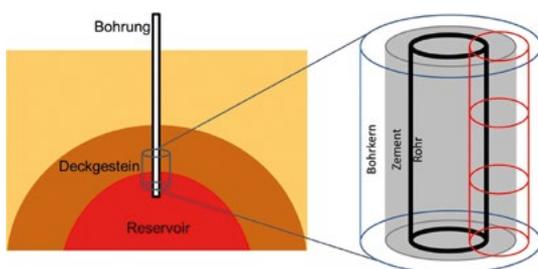


Abbildung 2: Skizze einer Speicherbohrung (oben) und die dafür hergestellten Probekörper (unten)



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)

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

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

### Förderzeitraum:

01.01.2016 – 30.09.2019

**Bewilligte Summe:** 1.242.255,70 EUR

### Ausführende Stelle:

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

**Förderkennzeichen:** 03ET6073B

### Leistungsplansystematik:

Wasserstoffspeicher, geologisch [EA2226]

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Projektträger:

Forschungszentrum Jülich GmbH

**Förderprogramm:** Energie

**Projektstatus:** Projekt abgeschlossen

### Projektlaufzeit:

01.01.2016–30.09.2019

### Projektleiter:

Prof. Dr. Leonhard Ganzer

### Projektkoordinator:

Dr. Viktor Reitenbach

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



Leonhard Ganzer



Viktor Reitenbach

## Autoklavenexperimente

In den Autoklaven wurden die Probekörper unter HPHT-Bedingungen Wasserstoff und Lagerstättenfluid ausgesetzt. Diese Versuche liefen bis zu sechs Monate. Veränderungen in der Dichtheit des Verbundes wurden mithilfe von Permeabilitätsmessungen und den mineralogisch-geochemischen und mikrotomographischen Untersuchungen in den Teilprojekten TP 1 und TP 5 untersucht.



Abbildung 4: Prototyp des HPHT-Autoklavs in der explosionsgeschützten Ausführung für Wasserstoffanwendungen (H<sub>2</sub>STORE Projekt) und Aufbau einer neuen HPHT-Zelle

## Teilvorhaben 4

Herkömmliche Softwarepakete für die Simulation von Strömungsprozessen in Untergrundreservoirien sind nicht in der Lage, die mikrobiellen Stoffwechselprozesse und das damit verbundene Wachstum von Biofilmen zu berücksichtigen. Deshalb ist im Teilprojekt 4 ein geeignetes gekoppeltes mathematisches Modell entwickelt, numerisch umgesetzt und für die Durchführung von exemplarischen Simulationsstudien genutzt worden. Für den Bohrungsnahbereich berücksichtigt das Modell die Ablösung und den Transport von Biofilmen und die daraus resultierende Veränderung der effektiven Porosität und Permeabilität. Weitere Simulationen sagen die mikrobiell induzierten Schwankungen der Gaszusammensetzung im Feldmaßstab vorher.

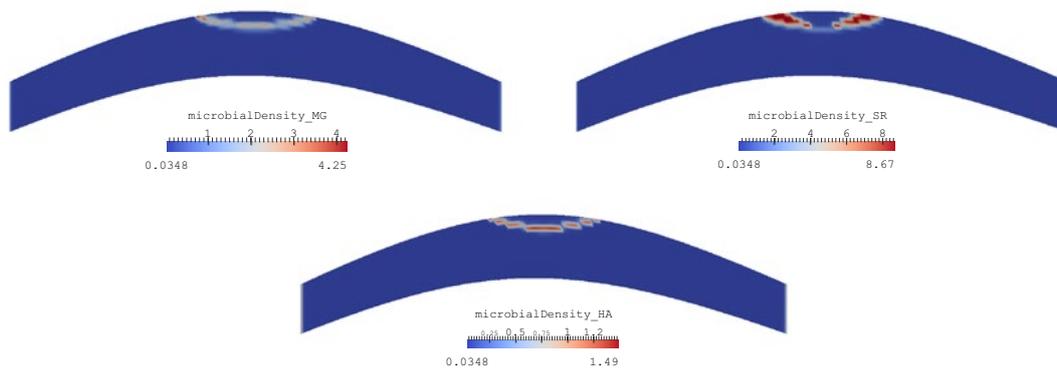
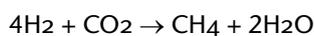


Abbildung 5: Mikrobielle Dichte von methanogenen Archaeen (oben links), sulfatreduzierenden Bakterien (oben rechts) und homoacetogenen Archaeen (unten)

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

Zuerst wurde ein theoretisches Modell für das Biofilmwachstum, die Ablösung und den Transport von Bakterien entwickelt. Das mathematische Modell entspricht dem Zweiphasenfluss eines teilweise mischbaren Mehrkomponentensystems mit vier chemischen Komponenten:  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  und  $H_2O$ . Es berücksichtigt eine variable Auflösung der Komponenten in den Phasen, die durch die Gleichungen des Phasengleichgewichts modelliert wurde. Die Reaktionsbedingungen entsprechen der Methanisierung:



Die Kinetik dieser Reaktion, die durch die Bakterien katalysiert wird, hängt stark mit der Kinetik des Bevölkerungswachstums zusammen. Zwei

zusätzliche Differentialgleichungen beschreiben die Dynamik von zwei mikrobiellen Strukturen: Biofilm und Plankton. Dadurch ist das Modell in der Lage, verschiedene Prozesse des mikrobiellen Verhaltens zu beschreiben: Konvektion und Diffusion des Planktons, Ablösen des Biofilms bei hoher Strömungsgeschwindigkeit und konvektiver Transport, Porenverstopfung durch Biofilmfragmente (Biokolmation).

Das theoretische Modell wurde numerisch für den Bohrungsnahbereich gelöst. Es zeigte sich, dass die effektive Permeabilität vom bakteriellen Wachstum abhängig ist und somit auch einen Einfluss auf die Bohrlochinjektivität hat.

### Simulation des Mehrphasenflusses in Porenspeichern im Feldmaßstab

Im Rahmen von Vorarbeiten wurde bereits ein numerischer Code auf der Basis von DuMu<sup>x</sup> erstellt, der in der Lage ist, die hydrodynamischen Prozesse gekoppelt mit einer biochemi-

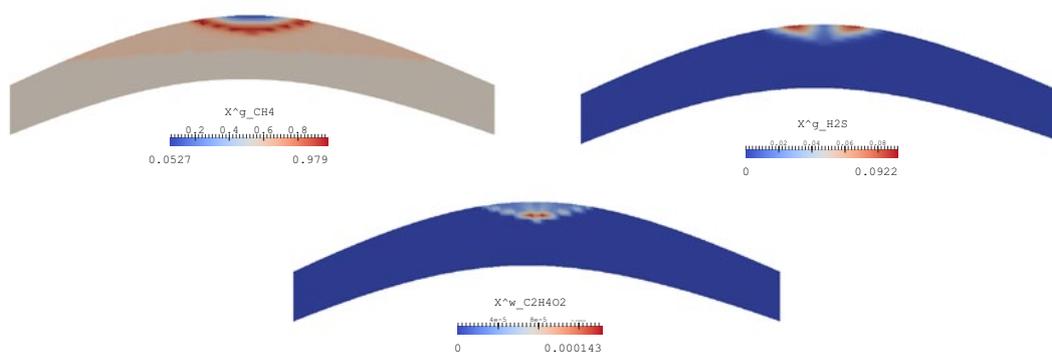


Abbildung 6: Methankonzentration in der Gasphase (oben links), Schwefelwasserstoffkonzentration in der Gasphase (oben rechts) und Essigsäurekonzentration in der Wasserphase (unten)

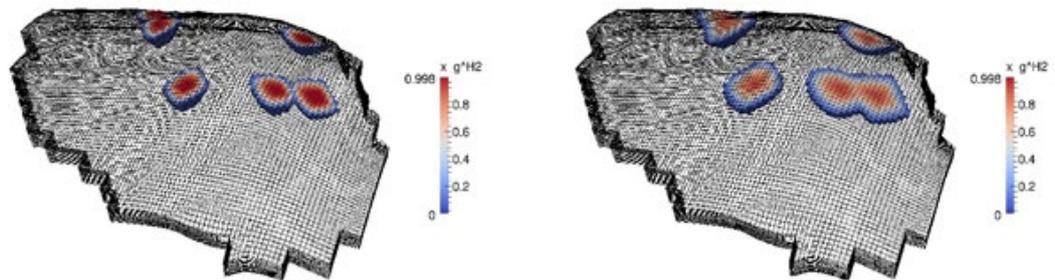


Abbildung 7: Wasserstoffkonzentration nach einem bzw. drei Jahren Speicherbetrieb

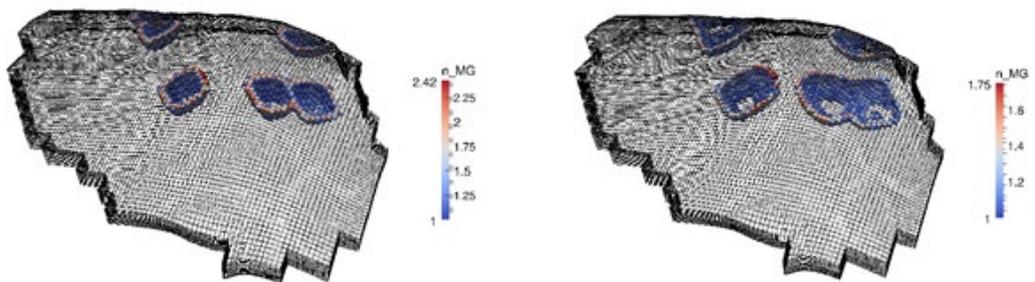


Abbildung 8: Anzahl der methanogenen Mikroorganismen nach einem bzw. drei Jahren Speicherbetrieb

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 Prozessen.

Mithilfe des entwickelten numerischen Modells ist eine Simulation eines Speicherszenarios im Feldmaßstab durchgeführt worden. Hierfür wurde ein dreidimensionales geologisches Modell einer antiklinalen Struktur und einer räumlichen Ausdehnung von ca. 3 x 5 km in den Simulator DuMu<sup>x</sup> importiert und mit dem neu entwickelten „2pncbio“-Modell verbunden. Sechs Speicherbohrungen wurden in der Lagerstätte platziert. Die Speicherbohrungen werden mit einer konstanten Gesamtrate betrieben. Der Betriebszeitplan umfasst ein Jahr Speicheraufbau und zwei Jahre zyklische Injektion

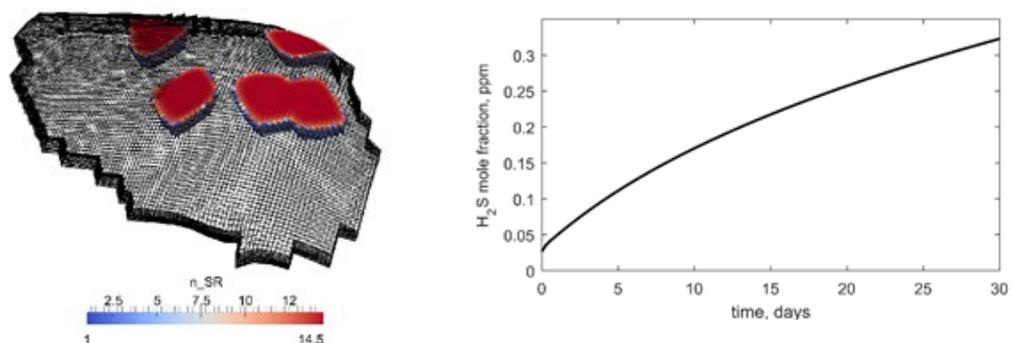


Abbildung 9: Dimensionslose Anzahl der sulfatreduzierenden Bakterien nach 1,5 Jahren (links) und H<sub>2</sub>S-Anteil im zurückgeführten Gas (rechts)

und Produktion. Insgesamt wurden 6 Speicherzyklen simuliert. In der ersten Simulation wurde nur die Aktivität von methanogenen Mikroorganismen berücksichtigt, die Ergebnisse sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 gezeigt.

In einer zweiten Simulation wurde zusätzlich die Aktivität von Sulfatreduzierern berücksichtigt. Die Simulationsergebnisse zeigen die Ausbreitung der sulfatreduzierenden Bakterien (Abbildung 9 links) und die H<sub>2</sub>S-Konzentration im zurückgeführten Gas (Abbildung 9 rechts).

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)

# 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 fluktuierender Energieerzeugung und fluktuierendem -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 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 zu gewährleisten.

## 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 Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal (EST) 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-Ionen-Batterie und Leistungselektronik zur Erbringung von Momentanreserve und anderen Systemdienstleistungen (ohne Primär- und Sekundärregelleistung sowie Minutenreserve) auf Niederspannungsebene
- Berücksichtigung des Einflusses der Belastungen aus den Systemdienstleistungen (SDL) auf die Batterie - insbesondere der Auswirkungen von dynamischen Belastungen

### Projektpartner:

- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)
- AKASOL AG
- Infineon Technologies AG
- Stöbich technology GmbH
- LTI Motion GmbH
- Tennet TSO GmbH, Harz Energie Netz GmbH (assoziiert)

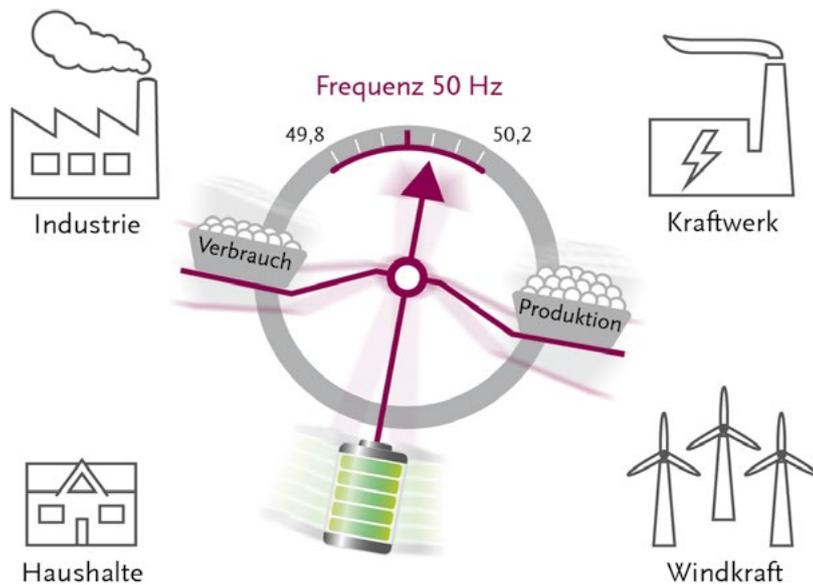


Abbildung 1: Darstellung des Gleichgewichts im elektrischen Energieversorgungssystem zwischen fluktuierender Erzeugung und Verbrauch

- und sog. Mikrozyklen im Subsekundenbereich auf die Alterung des Speichers, sowie die 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

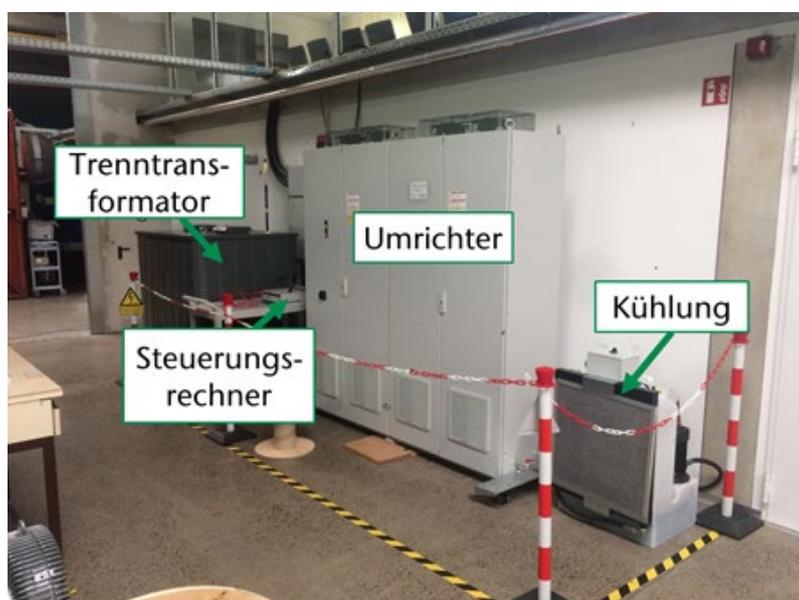


Abbildung 2: Integriertes 400kW-ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 1 am Energiecampus

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**

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

**Fördermittelgeber:**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

**Förderkennzeichen:**

03ET6123A

**Projektlaufzeit:**

01.06.2017–31.05.2020

**Projektleiter:**

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

**Projektkoordinator:**

Dr.-Ing. Ralf Bengler

**Projektbearbeiter:**

Dipl.-Ing. Frank Deblon  
Jens Grabow, M.Sc.

## Projektstand

Im derzeitigen Projektstand werden die entwickelten Komponenten der Projektpartner in das finale Gesamtsystem integriert. Dazu werden schrittweise die neuen Komponenten eingebaut und ihre Funktion getestet. Die Abbildung 2 zeigt das am Energiecampus installierte ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 1.

Der Umrichter ist über einen Trenntransformator direkt an die Niederspannungs-Hauptverteilung am Energiecampus des EST angeschlossen und speist somit direkt in das Mittelspannungsnetz ein. Die Steuerung des Umrichters Pilot 1 erfolgt nach dem am IEE (Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme) entwickelten und patentierten Prinzip der virtuellen Synchronmaschine (VISMA) noch über einen externen Steuerungsrechner. Mit dieser Trennung von Steuerungsrechner und Umrichter kann bereits früh vor Projektende flexibel und mit verhältnismäßig wenig Aufwand das Verhalten des Umrichtersystems bei verschiedenen Parametrierungen und Ansteuerungstechniken der Leistungselektronik am Netz getestet werden. Das Umrichtersystem konnte dabei bereits 400 kW Momentanreserve netzparallel in das öffentliche Netz einspeisen. In einem weiteren Schritt erfolgt der Anschluss des Hochleistungsbatteriesystems an das Umrichtersystem Pilot 1. Dabei werden ausgiebige Leistungstests zur Analyse des Gesamtsystemverhalten und Batterielebensdauerverhalten durchgeführt. Die gesammelten Ergebnisse fließen dabei laufend in das derzeit entwickelte ReserveBatt-Umrichtersystem Pilot 2 mit ein, in dem alle Steuerungs- und Überwachungsfunktionen in einem integrierten System zusammengeführt werden. So kann das Umrichtersystem später dauerhaft in einer industriellen Feldumgebung betrieben werden.



Hans-Peter Beck



Ralf Bengler

# CoNDyNet II: Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze

## Kurzfassung

Das Ziel dieses Vorhabens am EST ist es, unterschiedliche Stromrichterkonzepte, wie zum Beispiel das spannungseinprägende Umrichtersystem mit Winkelverschiebung, die Virtuelle Synchronmaschine als netzstabilisierendes Umrichtersystem im Insel- und Netzparallelbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Bereitstellung von Systemdienstleistungen zu testen. Weiterhin soll das Betriebsverhalten in Kombination mit stromeinprägenden Umrichtern, wie sie heute vielfach im Einsatz sind, überprüft werden. Aus der Simulation und der experimentellen Erprobung werden Handlungsanweisungen abgeleitet für einen sicheren Betrieb von umrichterdominierten Netzen.

## Abstract

The aim of this project is to test different power converter concepts, such as the voltage source inverter systems with angular displacement, the virtual synchronous machine as a grid stabilizing inverter system in island and grid parallel operation with special consideration of providing system services. Furthermore, the operating behavior in combination with current converters, as they are widely used today, has to be checked. From the simulation and the experimental testing, instructions are derived for the safe operation of converter-dominated grids.

## Zielsetzung des Forschungsverbundes:

Verschiedenste Studien kommen zu den Ergebnissen, dass zum Gelingen der Energiewende neue Flexibilitätsoptionen geschaffen werden müssen, und dass diese zu einem bedeutenden Teil in den Verteilnetzen entstehen werden. Daraus ergeben sich zum einen ein enormer Ausbaubedarf auf der Verteilnetzebene, zum anderen völlig neue Herausforderungen für die Betriebsführung. War es in der Vergangenheit noch möglich, Stabilitätsprodukte ortsunabhängig zu denken, so zeigt sich schon heute an der stark gestiegenen Zahl der netzbedingten Redispatch-Maßnahmen, dass diese Strategie in der Zukunft nicht mehr praktikabel ist. Mit

der steigenden Zahl an dynamischen Akteuren in den Netzen ist es nicht mehr möglich, diese isoliert zu analysieren, sodass ihre kollektive Dynamik in den Vordergrund rückt.

Die kollektive Dynamik von wechselrichterdominierten Stromnetzen stellt damit eines der zentralen ungelösten Forschungsprobleme der Energiewende [ENT17] dar. So muss die Frage nach der Erbringung der Momentanreserve in zukünftigen wie gegenwärtigen Netzen beantwortet werden. Schon heute beschränkt zum Beispiel Irland den Anteil an erneuerbaren Energien aufgrund des Mangels an Momentanreserve/Trägheit. Aber auch die Fragen, wie sich nichtlineare Störungen sowie stochastische Fluktuation und Ausfalls-Kaskaden in zukünftigen Netzen ausbreiten werden, und wie sich eine Anfälligkeit für solche Störungen vorhersagen und verringern lässt, sind weitgehend ungelöst. Die Konsequenzen solcher Effekte gehen oft weit über die Dynamik von Verteilnetzen hinaus und betreffen gekoppelte Teilsysteme in Systemen, also auch den Betrieb und die Planung von Stromnetzen auf allen Ebenen sowie die Kontrolle von Fluktuationen aufgrund verschiedener Ursachen (Verbraucher, Einspeiser, Handel). Auch bei Fragen nach dem Einfluss von Marktstrukturen und dezentraler Regelung auf kollektive dynamische Eigenschaften besteht weiter großer Forschungsbedarf, um die förderpolitischen Ziele einer weitreichenden Dekarbonisierung des Elektrizitätssektors zu erreichen.

### Projektpartner:

- Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (koordinierend)
- Forschungszentrum Jülich
- Technische Universität Dresden
- Jacobs University Bremen
- Frankfurt Institute for Advanced Studies
- Karlsruhe Institute of Technology
- Technische Universität Clausthal

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Kollektive Nichtlineare Dynamik Komplexer Stromnetze - CoNDyNet II -

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

### Projekträger:

Forschungszentrum Jülich GmbH

### Projektbearbeiter:

Dr.-Ing. Ralf Hesse  
Dr.-Ing. Dirk Turschner  
Steven Reineke, M.Sc.



Dirk Turschner



Steven Reineke

Das Verbundvorhaben CoNDyNet setzt sich mit dieser Fragestellung aus mathematisch-systemischer Sicht auseinander und bringt dabei das Methodenspektrum aus der theoretischen Physik, Mathematik und Elektrotechnik zum Tragen. Damit wurde in den letzten Jahren ein weltweit einzigartiger Forschungszweig eröffnet.

### Ziele des EST-Teilprojektes

Die zuverlässige Funktion von elektrischen Netzen erfordert nicht nur die Einspeisung ausreichender Energiemengen, sondern auch die Erbringung einer Reihe von Systemdienstleistungen. Zu den Systemdienstleistungen gehören u.a. die Aufgaben wie Spannungshaltung, Frequenzhaltung, Vorhaltung von Blindleistung, Bereitstellung von Momentanreserve und die Möglichkeit, nach einem Stromausfall den Wiederaufbau der Versorgung zu gewährleisten. Diese Leistungen werden bisher noch überwiegend durch konventionelle Kraftwerke erbracht, die deshalb immer mit einer Mindestkapazität (Must-run-Kapazität) am Netz sein müssen. Einige dieser Aufgaben liegen im Verantwortungsbereich des Netzbetreibers, andere erfordern einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Netzbetreibern, den Kraftwerksbetreibern und zukünftig verstärkt mit den Verbrauchern. Für die Bereitstellung von Momentanreserve sind derzeit ausschließlich die zentralen Großkraftwerke verantwortlich. Das Systemverhalten des elektrischen Netzes wird durch die eingesetzten Betriebsmittel beeinflusst und bisher vorwiegend durch das Verhalten des Synchrongenerators bestimmt, welcher in großen Kraftwerkeinheiten zur Energieerzeugung eingesetzt wird. Diese Generatoren liefern damit einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des elektrischen Netzes. Durch den zunehmenden Anteil von erneuerbaren Energien wie Windkraft- und Photovoltaikanlagen, nimmt die elektrische Energie, welche über leistungselektronische Umrichter ins Netz eingespeist wird, stetig zu.

Hinzu kommt der Einsatz neuer steuerbarer Technologien durch den notwendigen Netzausbau, wie HGÜ-Anlagen (Umrichter zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) oder FACTS (Flexible AC Transmission System), welche ebenfalls selbstgeführte leistungselektronische Umrichter nutzen und vermehrt ins Netz einspeisen. Damit nimmt der Einfluss von

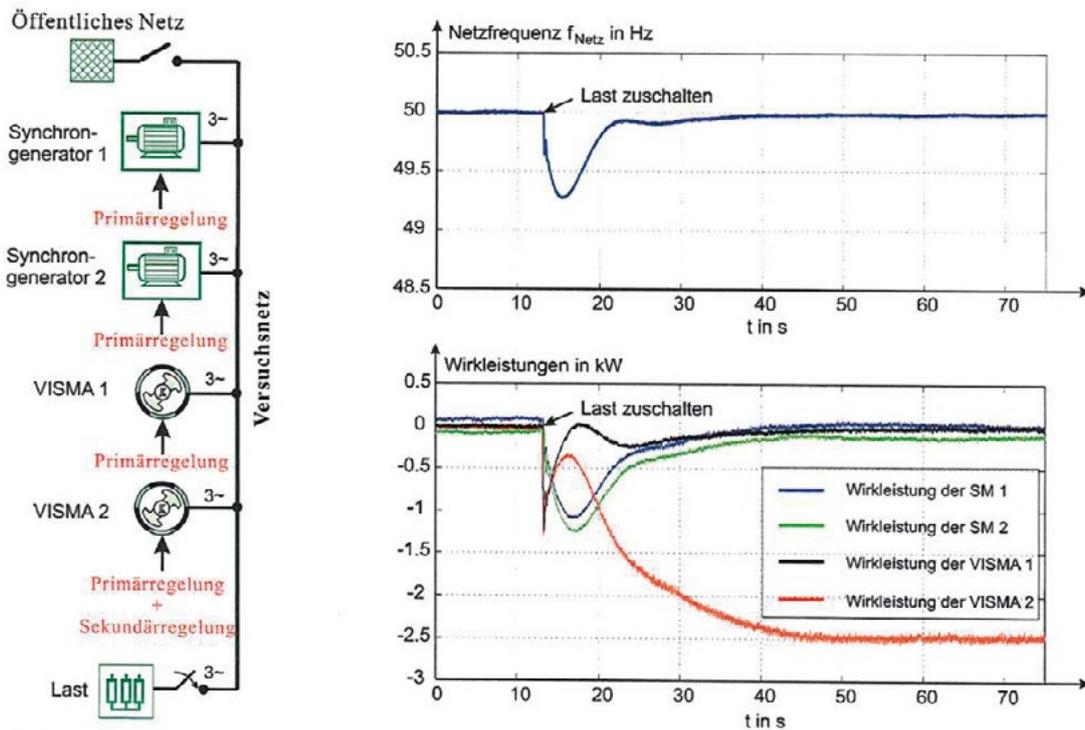


Abbildung 1: Wirkleistungsaustausch verschiedener Einspeisesysteme im Inselnetzbetrieb bei Lastzuschaltung. Die Skizze zeigt die Versuchsanordnung im Verteilnetzlabor des EST.

Umrichter und deren Regelung auf das Systemverhalten immer weiter zu und muss bei Stabilitätsbetrachtungen berücksichtigt werden.

Das Ziel dieses Antrages ist es, unterschiedliche Stromrichterkonzepte, wie zum Beispiel das spannungseinprägende Umrichtersystem mit Winkelverschiebung, die Virtuelle Synchronmaschine als netzstabilisierendes Umrichtersystem im Insel- und Netzparallelbetrieb unter besonderer Berücksichtigung der Bereitstellung von Systemdienstleistungen zu testen. Weiterhin soll das Betriebsverhalten in Kombination mit stromeinprägenden Umrichtern, wie sie heute vielfach im Einsatz sind, überprüft werden. Aus der Simulation und der experimentellen Erprobung werden Handlungsanweisungen abgeleitet für einen sicheren Betrieb von umrichterdominierten Netzen.

## Projektstand

Das Verteilnetzlabor des EST bot in der Vergangenheit die Möglichkeit, unterschiedliche Einspeisesysteme im Verbundbetrieb zu testen. Abbildung 1 zeigt den Aufbau mit Synchronmaschinen und Umrichtersystemen (VISMA-Systemen), die das Verhalten von Synchronma-

schinen nachbilden. Sowohl Inselnetzbetrieb, als auch Netzparallelbetrieb ist möglich. Abbildung 1 zeigt den Wirkleistungsaustausch im Verbundbetrieb in einem Inselnetz. Die unterschiedlichen implementierten Regelungen sorgen für einen stabilen Inselnetzbetrieb.

Abbildung 2 zeigt den geplanten Aufbau im Verteilnetzlabor. Unterschiedliche Einspeisesysteme können hierbei im Verbund betrieben werden. Zwischen die einzelnen Einspeiser können Netzersatzelemente geschaltet werden, sodass unterschiedlichste Netztopologien getestet werden können. Über eine steuerbare Spannungsquelle (ACQS) können gezielt Störungen eingebracht werden. Die Anlage befindet sich zurzeit im Aufbau. Die Regelungsstrategien werden in der Simulation implementiert und getestet.

## Literatur

[ENT17] ENTSO-E. High penetration of power electronic interfaced power sources (HPoPEIPS). [https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-3/user\\_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic-interfaced-power-sources.pdf](https://consultations.entsoe.eu/system-development/entso-e-connection-codes-implementation-guidance-d-3/user_uploads/igd-high-penetration-of-power-electronic-interfaced-power-sources.pdf), 2017.

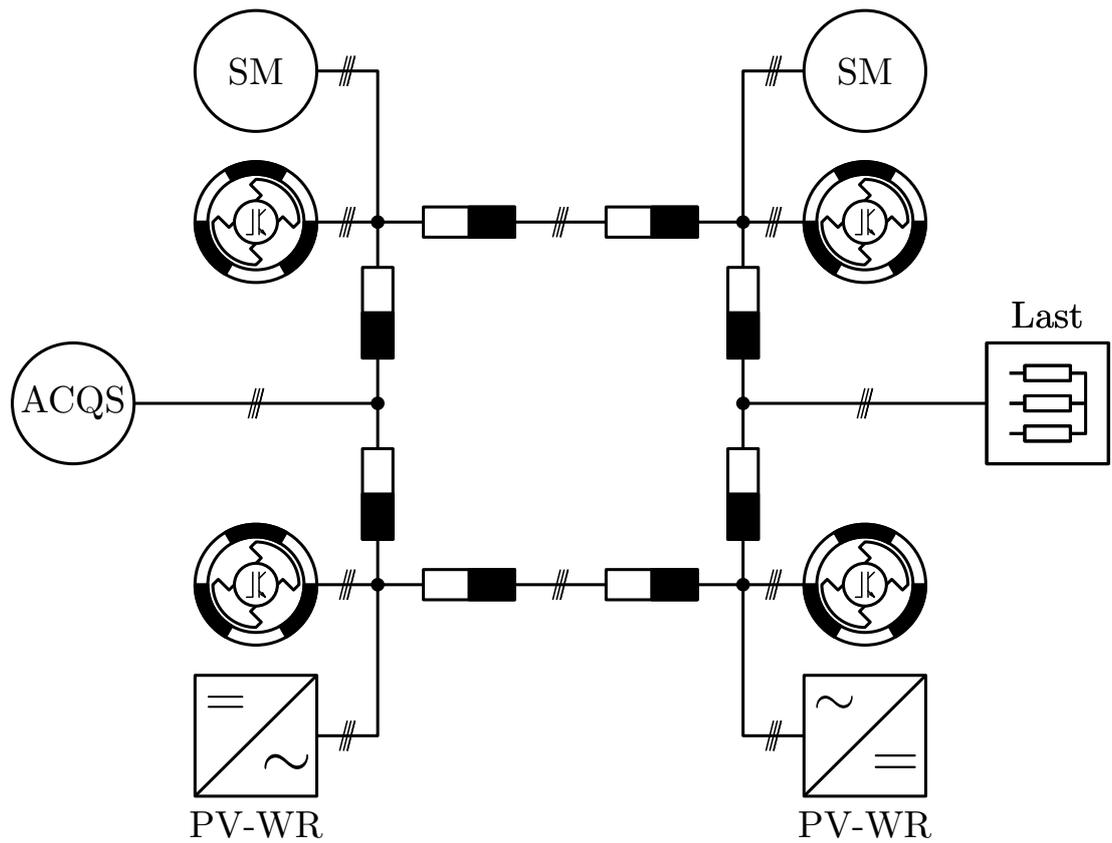


Abbildung 2: Geplantes und teilweise implementiertes Mehrknotennetz für Stabilitätsuntersuchungen im Verteilnetzlabor des EST. Konventionelle Umrichtersysteme (PV-inverter) arbeiten zusammen mit Virtuellen Synchronmaschinen (VISMA), echten Synchronmaschinen (SM) und einer steuerbaren Quelle (ACQS) im Verbundbetrieb.

# ZiLsicher: Zink-Luft-Akkumulator als sicherer elektrochemischer Speicher für emissionsarme und explosionsgeschützte Industriebereiche

## Kurzfassung

Mit dem Beschluss der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen sukzessive zu verringern, werden erneuerbare Energiequellen immer bedeutender. Durch das fluktuierende Verhalten von Wind- und Sonnenenergie gewinnen vor allem elektrochemische Speichertechnologien an Bedeutung. Die Nachfrage nach für diese Speicher erforderlichen Elementen wie Lithium und Vanadium wird in Zukunft steigen, sodass auch ein Umdenken bei den Rohstoffen notwendig ist. Zink weist vielversprechende Eigenschaften bezüglich der Verfügbarkeit und der Umweltverträglichkeit auf und gilt als ein aussichtsreiches Material für zukünftige wiederaufladbare Batterien.

Derzeit wird die Zink-Luft-Batterie nur als Primärzelle in Form von Knopfzellen für Hörgeräte kommerziell vertrieben. Die Wiederaufladbarkeit dieser Batterie ist aufgrund von Passivierungserscheinungen an der Zinkelektrode beim Entladen und durch die Dendritenbildung beim Aufladen bisher auf eine niedrige Zyklenzahl reduziert. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts ZiLsicher soll eine Zink-Luft-Batterie entwickelt werden, die durch eine geeignete Betriebsweise über mehrere 100 Zyklen hinweg eine stabile Leistungsentnahme ermöglicht. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sollen am Projektende zusammengeführt werden und in den Aufbau eines Demonstrators mit einer Leistung von 100 W einfließen.

## Abstract

According to the decision of the German federal government to reduce the greenhouse gas emissions, renewable energy sources are becoming more important in the upcoming years. Because of the fluctuating characteristics of wind and solar energy, electrochemical energy storage are acquiring ever greater importance in the near future. The demand for elements required for these systems such as lithium and vanadium will increase steadily. Zinc is an alternative element with high availability and envi-

ronmental friendliness which possesses a high potential as anode material in rechargeable batteries.

Today zinc-air batteries only are commercially available as primary cells for the use in hearing aids. The rechargeability of the battery is reduced to a low number of cycles due to passivation during discharge and dendrite growth during charge. Within the framework of the project ZiLsicher, which is funded by the BMBF,

## Kooperationspartner

- Dr. Martin Krebs, Alexandra Groß, VARTA Microbattery GmbH, Leitung des Konsortiums und Elektrodentests in Knopfzellen
- Dr. Thorsten Hickmann, Oliver Zielinski, Eisenhuth GmbH & Co. KG, Gehäuse- und Dichtungskonzept
- Dr. Konstantinos Douzinas, Andreas Bulan, Covestro Deutschland AG, Katalysatorzusammensetzung auf der bifunktionalen Gasdiffusionselektrode (GDE)
- Dr. Sebastian Eckstein, Alantum Europe GmbH, Metallschäume als poröse Trägermaterialien für die Zinkelektrode
- Prof. Wolfgang Schade, Prof. Eike Hübner, Mingji Li, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Abteilung für Faseroptische Sensorsysteme, Laserabscheidung von Katalysator für bifunktionale Gasdiffusionselektrode
- Prof. Arno Kwade, Dr. Jeroen Volbeda, Institut für Partikeltechnik, TU Braunschweig, Entwicklung einer hochporösen Zinkelektrode
- Dr. Armin Melzer, Petra Gehrke, Mathias May, Grillo-Werke AG
- Benjamin Kraft, VARTA Storage GmbH
- Oliver Scholz, MIAG Fahrzeugbau GmbH
- Dr. Harald Wilms, Zeppelin Power Systems GmbH
- Markus Knefel, Dominik Herper, GKD-Gebr. Kufferath AG

a rechargeable zinc-air battery has to be developed. For a stable performance, it is necessary to achieve for several 100 charge and discharge cycles. After the evaluation of materials and operating parameters, the gained knowledge will be used for the development of a prototype battery system with an electrical power of 100 watt.

### Projekthintergrund

Mit dem Beschluss der Bundesrepublik Deutschland, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 55 Prozent gegenüber 1990 zu verringern, ist ein Umdenken der derzeitigen Energiepolitik erforderlich [1]. Der Verzicht auf eine fossile Energieversorgung hat zur Folge, dass die erneuerbaren Energiequellen eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. Diese treten stark fluktuierend auf und erfordern deshalb ein geeignetes Energiemanagement. Für die kurzfristige Speicherung kommen dabei vor allem elektrochemische Speicher in Frage. Der Bedarf an den Elementen Lithium und Vanadium, die für gängige Batteriespeichertechnologien benötigt werden, wird in den kommenden Jahren wei-

ter ansteigen, was zu Beschaffungsproblemen führen könnte. Zink hingegen weist vielversprechende Eigenschaften bezüglich der Verfügbarkeit und der Umweltverträglichkeit auf [2]. Derzeit wird die Zink-Luft-Batterie überwiegend in Form von Knopfzellen für Hörgeräte kommerziell eingesetzt. Der Nachteil ist dabei, dass dieser Batterietyp bisher nicht wieder elektrisch aufgeladen werden kann. Die Wiederaufladbarkeit wird durch die Dendritenbildung beim Aufladen und Passivierungserscheinungen an der Zinkelektrode beim Entladen stark beeinträchtigt (siehe Abbildung 1).

Im durchgeführten Projekt ist die Anwendung einer elektrisch wieder aufladbaren Zink-Luft-Batterie primär in Industriebereichen mit strengen Emissionsauflagen vorgesehen. Dazu gehören vor allem die dezentrale Stromversorgung und die Grundlastdeckung von Schiffen sowie industrielle Transportsysteme. Weiterhin bietet diese Batterie aufgrund der systemspezifischen Sicherheitsmerkmale eine sichere Anwendung in explosionsgeschützten Industriebereichen. Unkontrolliert ablaufende Reaktionen, die in Folge eines Kurzschlusses auftreten, können durch eine Unterbrechung

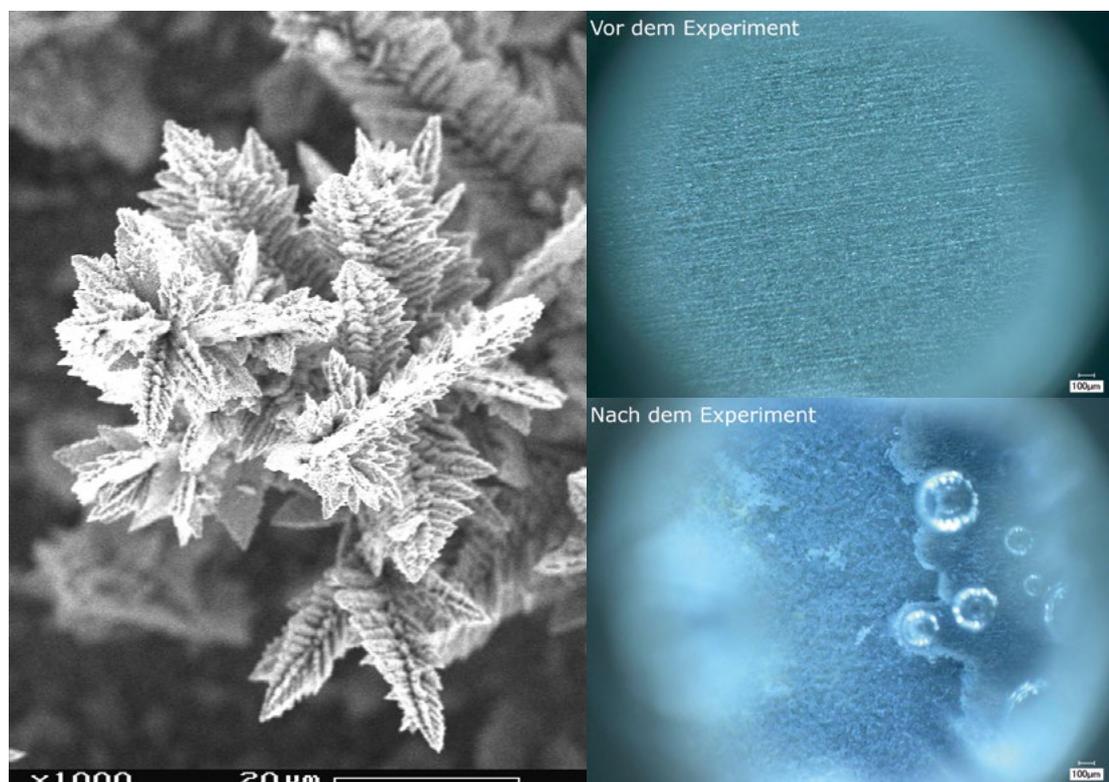


Abbildung 1: Mit einem Rasterelektronenmikroskop aufgenommene Dendritenstruktur auf der Zinkelektrode (links) und mit einem 3D-Mikroskop beobachtete Passivschichten auf einer Zinkoberfläche vor und nach dem Experiment (rechts) [3,4]

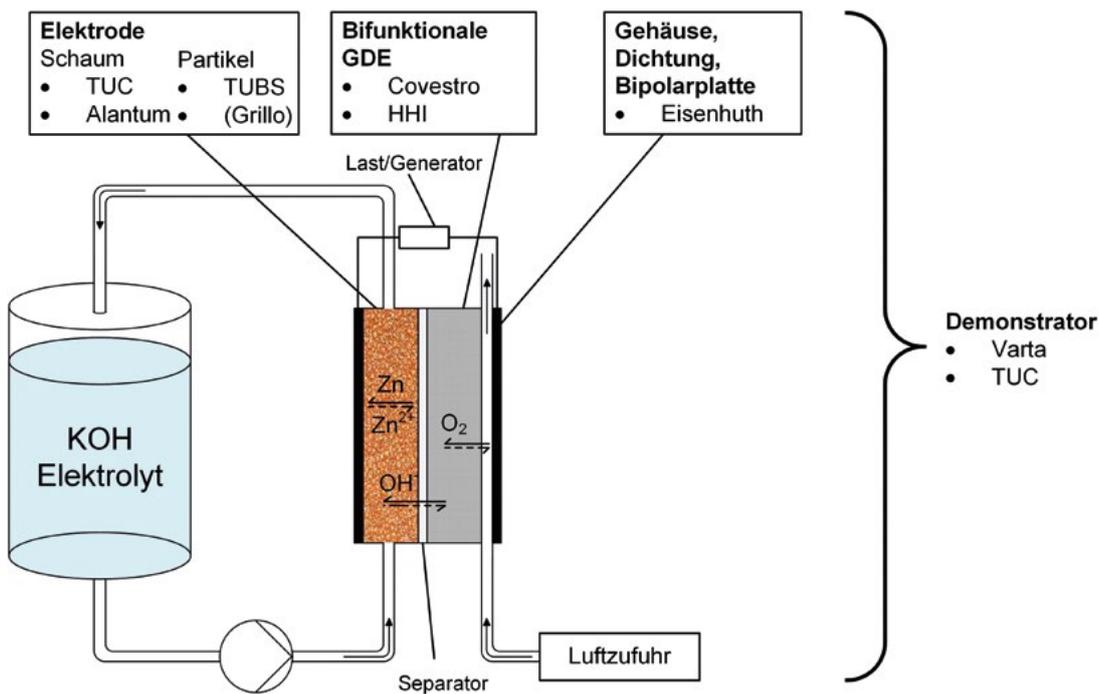


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer elektrisch wieder aufladbaren Zink-Luft-Batterie und Überblick zu den Aufgabenbereichen im Projektkonsortium

der Luftzufuhr in einfacher Weise unterbunden werden.

### Funktionsweise und Projektziele

Eine schematische Darstellung des Konzeptes einer elektrisch wieder aufladbaren Zink-Luft-Batterie und der Aufgabenbereiche innerhalb des Projektvorhabens ZiLsicher findet sich in Abbildung 2.

Die Batterie wird mit einem Elektrolyten (30 Gew.-% KOH) durchströmt, der in einem externen Tank aufgefangen und dem System wieder zugeführt wird. Vorangegangene Untersuchungen in den Projekten AKUZIL und Zink-PLUS haben gezeigt, dass ein bewegter Elektrolyt zum einen die Dendritenbildung und zum anderen die Entstehung der Passivierungsschichten an der Zinkanode positiv beeinflussen kann. Weiterhin trägt ein gepulstes Ladeverfahren dazu bei, das Wachstum von Dendriten an der Zinkelektrode zu unterdrücken, was eben-

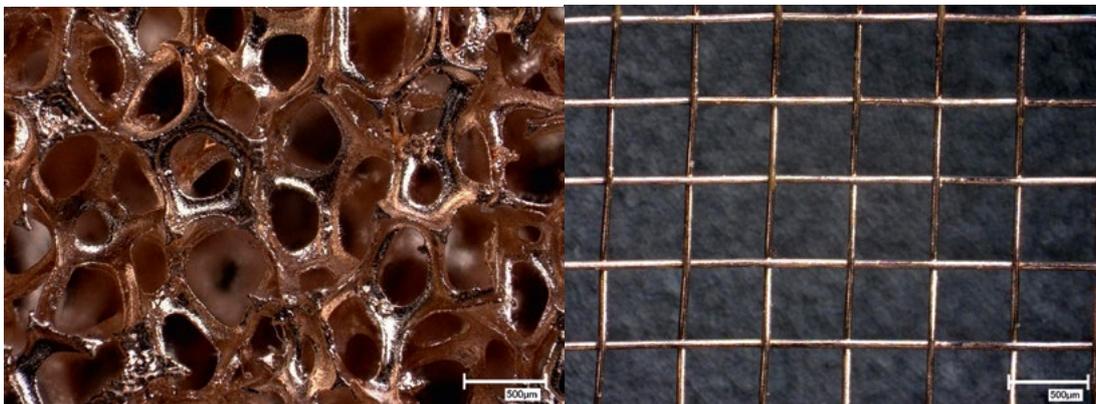


Abbildung 3: Mit dem Mikroskop aufgenommene Struktur von einem Metallschaum (links) [5] und einem Metallgewebe aus Kupfer (rechts)

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

ZiLSicher: Zink-Luft-Akkumulator als sicherer elektrochemischer Speicher für emissionsarme und explosionsgeschützte Industriebereiche

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

### Förderkennzeichen:

03XP0191B

### Laufzeit:

01.01.2019–31.12.2021

### Projektleiter:

Prof. Thomas Turek  
Prof. Ulrich Kunz

### Projektbearbeiter:

Sascha Genthe, M.Sc.



Thomas Turek



Ulrich Kunz



Sascha Genthe

falls eine erhöhte Lebensdauer zur Folge hat. Ein Ansatz zur Unterstützung einer gleichmäßigen Zinkauflösung und –abscheidung ist die Verwendung eines hochporösen Metallschaums als Anodenstützstruktur. Durch die Variation der Porengröße und des Materials soll ein Optimum der Schaumstruktur herausgearbeitet werden. Ein weiterer innovativer Ansatz wird an der TU Braunschweig (TUB) untersucht, der das Aufbringen einer Suspension aus Zinkpartikeln mit einem polymerbasierten Binder auf einem Metallgewebe beinhaltet (s. Abbildung 3).

Neben der Unterdrückung der Alterungsmechanismen an der Zinkanode ist ein stabiler Betrieb über mehrere 100 Zyklen hinweg nur denkbar, wenn die Kathode ebenfalls eine hinreichende Stabilität aufweist. Der herkömmliche Aufbau einer elektrisch wieder aufladbaren Zink-Luft-Batterie besteht aus drei Elektroden - einer Zinkelektrode und zwei Elektroden für die Sauerstoffreduktion und -entwicklung. Das hat zur Folge, dass die Lade- und Entladevorgänge eine aufwändige Verschaltung benötigen, da zwischen den beiden Sauerstoffelektroden nach jedem Zyklus umgeschaltet werden muss. Im Rahmen des Projekts soll nun eine bifunktionale Gasdiffusionselektrode (GDE) von der Covestro Deutschland AG entwickelt werden. Damit wird nur eine Sauerstoffelektrode benötigt und der Aufbau der Batterie kann deutlich vereinfacht werden. Diese GDE bestehen aus den Materialien Silber, Cobaltoxid und Polytetrafluorethylen (PTFE). Im Herstellungsverfahren werden die Komponenten in Form einer Dispersion als dünne Schicht auf einem Nickelnetz, das als Stromableiter fungiert, aufgetragen. Für die Luftversorgung der GDE kann die Umgebungsluft verwendet werden. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass das Kohlenstoffdioxid zur Karbonat-Bildung im Elektrolyten führt. Das kann einen erheblichen Einfluss auf die Alterung der GDE und die Elektrolytleitfähigkeit haben.

Das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI) arbeitet ebenfalls an der Herstellung einer bifunktionalen GDE, die mittels Ultrakurzlaserverfahren hergestellt werden soll. Darüber hinaus ist geplant, dieses Verfahren auch auf die neuartigen GDE von Covestro anzuwenden. Dadurch können vor allem eine Oberflächenvergrößerung der Elektrode erreicht und die Benetzungseigenschaften verbessert werden. In Abbildung 4 sind zwei Oberflächen der GDE dargestellt, die aufgrund der Laserstrukturierungen eine unterschiedliche Benetzung mit vollentsalztem Wasser aufzeigen.

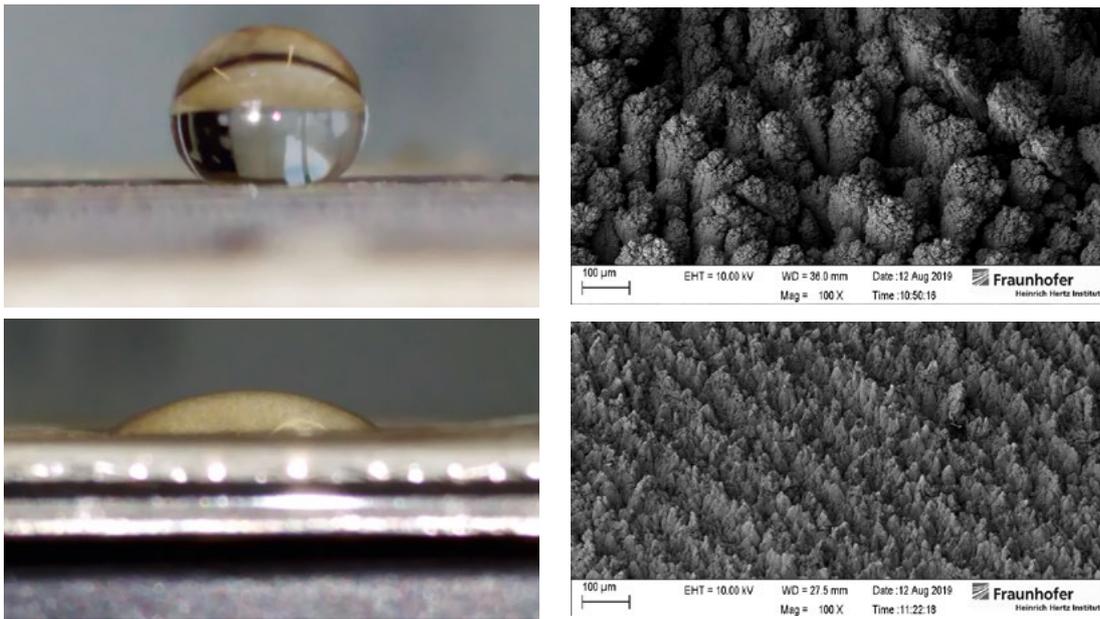


Abbildung 4: Darstellung des Benetzungsverhaltens der GDE-Oberfläche (links) in Abhängigkeit von den Oberflächenstrukturen, die mittels Ultrakurzlaserverfahren hergestellt wurden (rechts) (Bilder HHI).

Das Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT) der TU Clausthal beschäftigt sich vor allem mit der Charakterisierung der Elektroden und dem Betrieb der Zink-Luft-Batterie. Die Strukturänderungen der zyklisierten Zinkanode sollen mittels Post-Mortem-Analysen erfasst werden. Dabei spielen sowohl optische Analysemethoden (REM) als auch Verfahren zur Elementaranalyse (EDX, AAS) eine wichtige Rolle. Die bifunktionale GDE soll in Halbzellentests in Hinblick auf die Zyklenstabilität untersucht werden. Aus den Laborversuchen in Vollzellen sind optimale Betriebsbedingungen, die unter anderem die Stromdichte und Betriebstemperatur umfassen, herauszuarbeiten und auf Kleinzellen im Leistungsbereich von 10 W zu übertragen. Diese Zellen enthalten bereits optimierte Elektroden und stellen den ersten Scale-up-Schritt dar. Die Aufgabe der Entwicklung und Herstellung des Gehäuses und der Dichtungen wird in diesem Projekt von der Firma Eisenhuth GmbH & Co. KG übernommen.

Am Ende des Projekts soll ein leistungsstabiler Demonstrator mit einer Leistung von 100 W in Zusammenarbeit mit dem Projektkoordinator VARTA Microbattery GmbH aufgebaut werden. Die daran durchgeführten Untersuchungen sollen schließlich Erkenntnisse liefern, die für eine Übertragung des neuen Konzepts in den industriellen Maßstab erforderlich sind.

## Literatur

- [1] Umweltbundesamt, Klimaschutzziele Deutschlands, 2019. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimaschutzziele-deutschlands> (abgerufen am 26. September 2019).
- [2] H. Stahl, D. Bauknecht, A. Hermann, W. Jenseit, A. Köhler, C. Merz, M. Möller, D. Schüler, M. Vogel, Ableitung von Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern, 2016. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_07\\_2016\\_ableitung\\_von\\_recycling-\\_umweltaforderungen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_07_2016_ableitung_von_recycling-_umweltaforderungen.pdf) (abgerufen am 26. September 2019).
- [3] M. Bockelmann, M. Becker, L. Reining, U. Kunz, T. Turek, Passivation of Zinc Anodes in Alkaline Electrolyte: Part I. Determination of the Starting Point of Passive Film Formation, *J. Electrochem. Soc.* 165 (2018) A3048-A3055. <https://doi.org/10.1149/2.0331813jes>.
- [4] J.-C. Riede, Untersuchungen des dendritischen Wachstum bei der elektrochemischen Abscheidung von Zink aus einer Kaliumhydroxidlösung für den Einsatz in Zink-Luft Systemen. Dissertation. Verlag Dr. Hut; Technische Universität Clausthal, 1. Auflage, 2018.
- [5] Alantum Europe GmbH. <http://www.alantum.com/en/view.php?mn=89> (abgerufen am 27. September 2019).

# HiPo-Stack: Berechnung von Strömungsfeldern für Bipolarplatten in Redox-Flow-Batterien

## Kurzfassung

Zwei der Hauptanwendungsfelder für elektrische Energiespeicher sind zum einen die Verschiebung der tagsüber durch Photovoltaik-Anlagen erzeugten Energie auf Zeiten, an denen die Energie benötigt wird, und zum anderen das Kappen von Leistungsspitzen, um somit die Netzanschlussgebühren zu reduzieren. Im Bereich der elektrochemischen Energiespeicher erweisen sich Redox-Flow-Batterien und im speziellen Vanadium-Redox-Flow Batterien (VRFB) als sehr vielversprechend. Um diese Art des Energiespeichers auch dezentral für kleine und mittlere Unternehmen oder Mehrfamilienhäuser einsetzen zu können und um mit anderen stationären Speichersystemen mithalten, muss die Leistungsdichte im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik deutlich erhöht werden. Durch neuartige Verfahren ist es möglich, dünne, flexible und prägend verformbare Graphit-Bipolarplatten herzustellen, die großes Materialeinsparpotential besitzen, sich durch Prägeverfahren sowohl einfach als auch preiswert ver-/bearbeiten lassen und somit eine Entwicklung von kosteneffizienteren Batterien zu ermöglichen. Das Kooperationsprojekt „HiPO-Stack“ zwischen den Firmen Eisenhuth, Volterion, der TU Braunschweig und der TU Clausthal hat sich die Entwicklung einer solchen VRFB zum Ziel gesetzt. Um die Leistungsdichte der Zell-Stacks weiter zu erhöhen bzw. die Kosten pro kW zu senken, werden die Zellen durch neue Konzepte auf dem Gebiet der Halbzellenseparatoren und mit Strömungsoptimierungen durch ein Flowfield ergänzt.

## Abstract

The two main fields of application for energy storage units are first: shifting the energy generated during the day to times, e.g. in the evening or at night, when it's most needed, and second: to level performance peaks and thereby lower grid connection fees. One of the most promising chemical energy storage systems are the redox flow batteries and particularly vanadium redox flow batteries (VRFB). To use this technology effectively in a decentra-

lized way, e.g. in SME or apartment buildings, the power density of this stationary energy storage has to be increased significantly compared to state of the art concepts. Through new procedures it is possible to produce graphite bipolar plates which are flexible and thin, have great material saving potential and can be processed both easily and inexpensively through embossing procedures and thus enables the development of cost efficient batteries. The cooperation project "HiPO-Stack" between the companies Eisenhuth, Volterion, TU Braunschweig and TU Clausthal aims to develop such a VFB. As part of this project new membrane materials, bipolar plate and flow field concepts are introduced to design and create a high performance cell-stack that has low cost per kW.

## Projekthintergrund

Wichtige Anwendungsfelder für elektrische Energiespeicher sind der Ausgleich zwischen dem schwankenden Angebot erneuerbarer Energie und dem Bedarf sowie die Kappung von Leistungsspitzen zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes. Im Bereich der elektrochemischen Energiespeicher erweisen sich Redox-Flow-Batterien und im speziellen Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VRFB) als sehr vielversprechend.

Um diese Art des Energiespeichers auch dezentral für kleine und mittlere Unternehmen oder Mehrfamilienhäuser einsetzen zu können und um verglichen mit anderen stationären Speichersystemen konkurrenzfähig zu werden, muss die Leistungsdichte der VRFB im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik deutlich erhöht werden. Durch neuartige Verfahren ist es möglich, dünne, flexible und verformbare Graphit-Bipolarplatten herzustellen. Diese besitzen großes Materialeinsparpotential, lassen sich durch Prägeverfahren sowohl einfach als auch preiswert ver-/bearbeiten und sind ohne die Notwendigkeit von Dichtungen mit Separator und Zellrahmen verschweißbar. Diese Eigenschaften der neuen Bipolarplatten bilden die Grundlage zur Entwicklung von kosteneffizienteren Vanadium-Redox-Flow-Batterien.

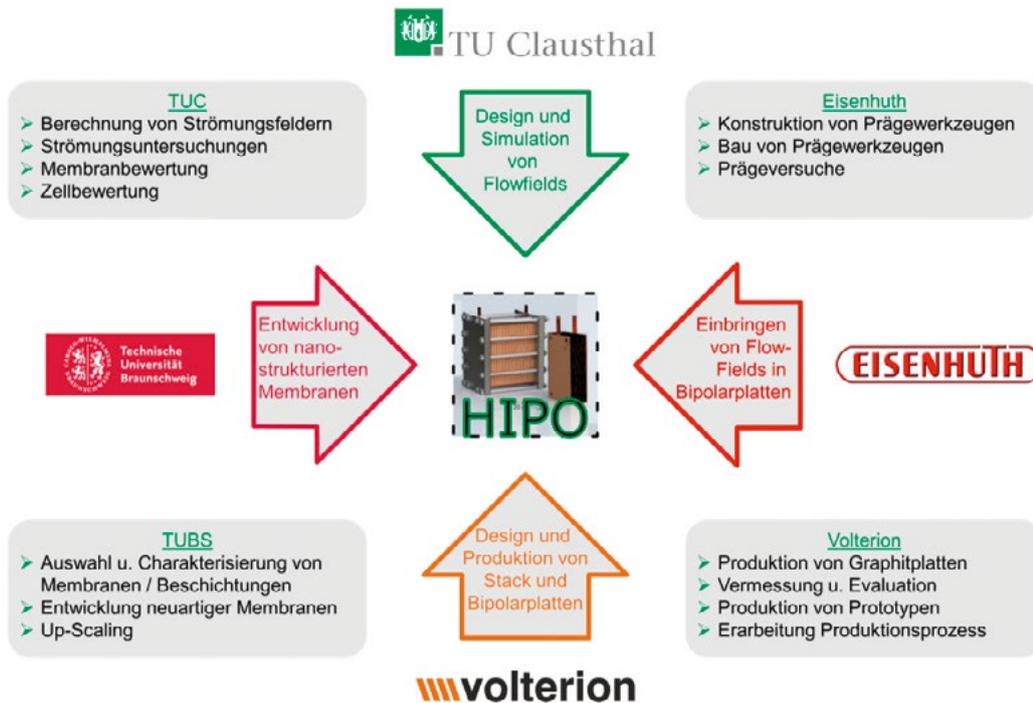


Abbildung 1: Arbeitspakete der Projektgruppe.

## Projektziele

Das Kooperationsprojekt „HiPo-Stack“, das von den industriellen Partnern Eisenhuth GmbH und Volterion GmbH sowie der TU Braunschweig und der TU Clausthal durchgeführt wird, hat sich die Entwicklung einer Hochleistungs-VRFB zum Ziel gesetzt. Dieses Vorhaben soll umgesetzt werden, indem die auf den dünnen Bipolarplatten basierenden Zellkonzepte der Firma Volterion als Grundlage für die Konzipierung eines neuen, optimierten Zelldesigns verwendet werden. Schwerpunkte der Optimierung sind zum einen die Strömungsführung in der Zelle/Elektrode und zum anderen der Separator, welcher in der Zelle eingesetzt werden soll. In der ursprünglichen Volterion-Zelle wird der Elektrolyt durch die Filzelektrode geleitet (Flow-Through-Prinzip), die zwischen nicht-strukturierten Bipolarplatten angeordnet ist.

Diese Art der Zelldurchströmung gilt es im Hinblick auf den Druckverlust und die Kontaktzeit zwischen Elektrolyt und Elektrode zu verbessern. Diese gegenläufigen Größen können durch das geschickte Einbringen eines geeigneten Strömungsfeldes in die Bipolarplatte optimiert werden. Da die chemische Reaktion nur in der Filzelektrode stattfinden kann, bewirkt

eine lange Kontaktzeit mit dem Filz zwar eine vollständige Reaktion, erhöht aber den Druckverlust in der Zelle im Gegensatz zur freien Strömung. Bei einer kurzen Kontaktzeit ist der Druckverlust gering, was aber eine unvollständige Reaktion zur Folge haben kann. Prinzipiell lässt sich dieses Problem durch Einbringen von Strömungskanälen in die Bipolarplatten lösen. Aufgrund der Beschaffenheit der von Volterion entwickelten Bipolarplatte sind herkömmliche, tief in die Platte gefräste Kanäle aber nicht realisierbar. Bei den dünnen und biegsamen Bipolarplatten muss das Strömungsfeld aufgeprägt werden.

Ein großer Kostenfaktor bei VRFB ist der Separator, der in vielen kommerziellen Anwendungen aus einer anionen- oder kationenleitenden Membran besteht. Um die Kosten der VRFB weiter zu senken, soll diese Membran durch eine

## Projektpartner

- TU Braunschweig,
- Eisenhuth GmbH
- Volterion GmbH

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

HiPo-Stack: Berechnung von Strömungsfeldern für Bipolarplatten in Redox-Flow-Batterien

### Fördermittelgeber:

Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (BMWi)

### Förderkennzeichen:

16KN045255-57

### Laufzeit

01.06.2018–31.05.2019

### Projektleiter:

Prof. Thomas Turek  
Prof. Ulrich Kunz

### Projektbearbeiter:

Alexander Kubicka, M.Sc.



Thomas Turek



Ulrich Kunz



Alexander Kubicka

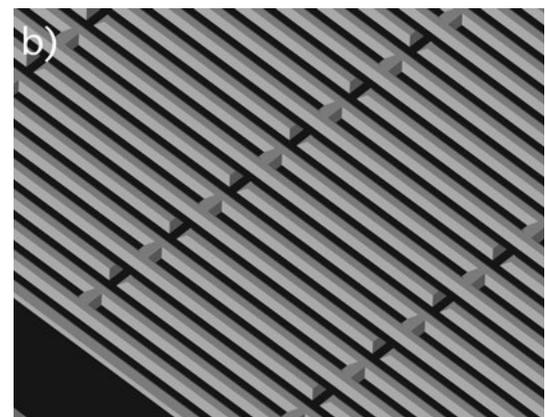
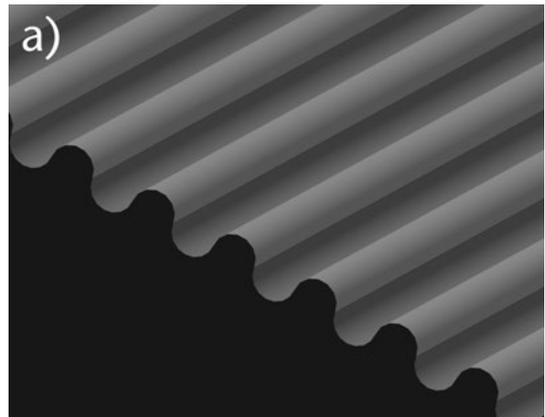


Abbildung 2: Mögliche Strömungsfeld-Geometrien unter Berücksichtigung der Randbedingungen. Oben (a): parallele Kanalführung, welche längs und quer zur Strömungsrichtung angeordnet werden kann. Unten (b): labyrinthartige Anordnung der Kanäle

neuartige, wesentlich günstiger herstellbare Separatorvariation ersetzt werden. Eine Zusammenfassung der Arbeitspakete jedes Projektpartners ist in Abbildung 1 dargestellt.

## Ergebnisse

Die Gestaltung des Strömungsfeldes ist in diesem Anwendungsfall aufwändig, da das Strömungsfeld aufgrund der Zellgeometrie und des Plattenmaterials gewissen Einschränkungen unterliegt. Der Prägewinkel und die minimale Kanalbreite sowie die geringe Kanaltiefe und das Eindringen der Filzelektrode in die Strömungskanäle müssen in die Konstruktion einbezogen werden. Das Strömungsfeld sollte so ausgelegt sein, dass der Druckverlust in der Zelle trotz der geringen Kanaltiefe und der teilweisen Blockierung durch den Filz so gering wie möglich ist. Um den Raum innerhalb der Zelle und damit die Leistungsdichte des Zellsta-

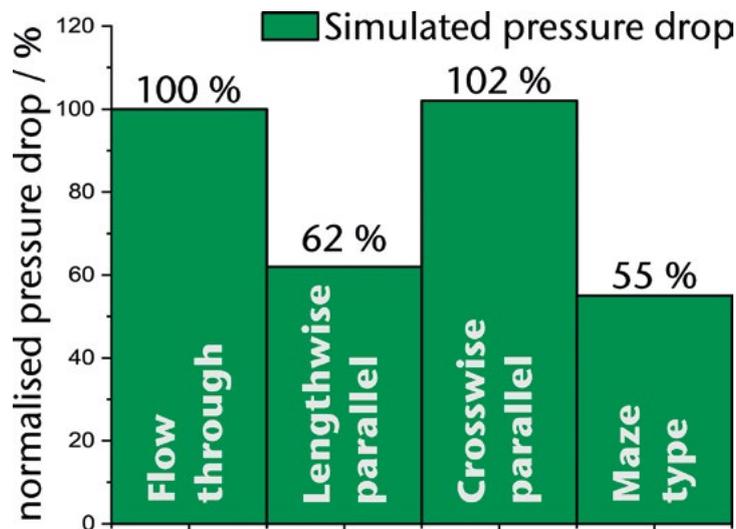


Abbildung 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der CFD-Simulationen.

pels optimal zu nutzen, sollte das Strömungsfeld auf beiden Seiten der Platte aufgebracht werden können. Abbildung 2 zeigt mögliche Strömungsfeldausführungen, die die oben genannten Kriterien erfüllen.

Das Design der Strömungsfelder wird mittels CFD-Strömungssimulationen unterstützt. Die starken Größenunterschiede zwischen den Abmessungen der Platte und ihrer Dicke erschweren eine Simulation des Systems erheblich und stellen eine große Herausforderung dar. Abbildung 3 zeigt die simulierten Druckverluste der untersuchten Strömungsfelder bei einer Tiefe der Kanäle von 0,3 mm und einer Eindringtiefe des Kohlenstofffilzes von 0,15 mm. Wie man der Darstellung entnehmen kann, lässt sich der Druckabfall in den Halbzellen bei Verwendung geeigneter Strömungsfelder trotz geringer Prägetiefe nahezu halbieren.

Mit den erhaltenen Simulationsergebnissen lässt sich eine weitere Vorauswahl an Strömungsfeldern treffen, die für ein mögliches Prägen in Frage kommen. Die Strömungsfelder, die sich in den Simulationen in Bezug auf den Druckverlust in der Zelle als geeignet herausgestellt haben, sind zum einen die labyrinthartige Struktur und zum anderen die parallelen Kanäle in Strömungsrichtung.

Im nächsten Schritt des Optimierungsprozesses werden diese Strömungsfelder unter Variation der Geometrieparameter, wie zum Beispiel die Breite der Kanäle, in die Bipolarplatten eingebracht. Anschließend wird ihre elektrochemische Leistungsfähigkeit in der VRFB untersucht. Die so gewonnenen Erkenntnisse werden erneut zur Anpassung der Geometrie verwendet, bis ein befriedigendes Ergebnis erreicht wird, welches schlussendlich mit den neu entwickelten Separatoren zu einem „High Power Redox Flow Stack“ kombiniert werden kann.

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

## Kurzfassung

Der Bedarf an großtechnischen Speichermöglichkeiten zum Puffern von Leistungsspitzen nimmt aufgrund des steigenden Anteils an erneuerbaren Energien im deutschen Strommix und deren sowohl tages- als auch jahreszeitenabhängig starker Fluktuation stetig zu. Eine vielversprechende Technologie im stationären Bereich stellt dabei die Redox-Flow-Batterie dar. Bei diesen Batterien wird die Energie in Salzverbindungen, die in einem flüssigen, meist wässrigen Elektrolyten gelöst sind, gespeichert. Der Elektrolyt wird außerhalb der eigentlichen Zellen bzw. Stacks in Tanks gelagert und beim Betrieb der Batterie durch die Zellen gepumpt. Dort finden an den Elektroden, meist porösen

Kohlenstoffmaterialien, die Lade- bzw. Entladereaktionen statt. Als Stromkollektoren in den Zellen werden typischerweise Graphit-Compound-Bipolarplatten genutzt, die sowohl eine hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber dem meist stark korrosiven Elektrolyten als auch eine gute Leitfähigkeit aufweisen. Um großtechnisch benötigte Speicher im kW- bzw. MW-Bereich herstellen zu können, kann zum einen die Zellanzahl erhöht, und zum anderen die tatsächliche Zellfläche durch ein Scale-Up auf bis zu 2 m<sup>2</sup> Zellfläche vergrößert werden. Solch große Compound-Bipolarplatten lassen sich allerdings nicht wirtschaftlich mit den üblichen Herstellungsverfahren wie Spritzguss oder Heißpressen herstellen. Daher wurde in diesem Projekt ein neuartiges Extrusionsverfahren entwickelt, mit dem die kontinuierliche Strangextrusion der Platten möglich ist. Durch aufwändige Untersuchungen sowohl Ex- als auch In-Situ wurde sichergestellt, dass die neuartigen Platten eine vergleichbare Qualität gegenüber konventionell hergestellten Platten aufweisen. Da sich durch die größere Zellfläche die Anforderungen an die Strömungsführung des Elektrolyten innerhalb der porösen Elektrode erhöhen, wurden in diesem Projekt zusätzlich der Einfluss der Elektrode sowie verschiedener Strömungsfelder auf die Elektrolytverteilung und Leistung der Zelle untersucht. Im Anschluss an dieses erfolgreiche Projekt wurde das direkte Nachfolgeprojekt Re<sup>3</sup>dOx im September 2019 gestartet. Dieses neue Projekt untersucht die Recycling-Potentiale und -Pfade für Vanadium-Redox-Flow-Batterien.

### Projektpartner

- Centroplast
- Eisenhuth
- thyssenkrupp Industrial Solutions
- ZBT

### Weitere Kooperationspartner

- Prof. Joachim Schmidt, Dennis Düerkop, 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 demand for large-scale energy storages for buffering peak power is constantly increasing due to the growing percentage of highly fluctuating renewable energies in the German electricity mix. In this context, a promising technology for stationary applications is the redox flow battery. In this battery, the energy is stored in salt compounds, which are dissolved in a liquid, mostly aqueous electrolyte. The electrolyte is stored outside the actual cells

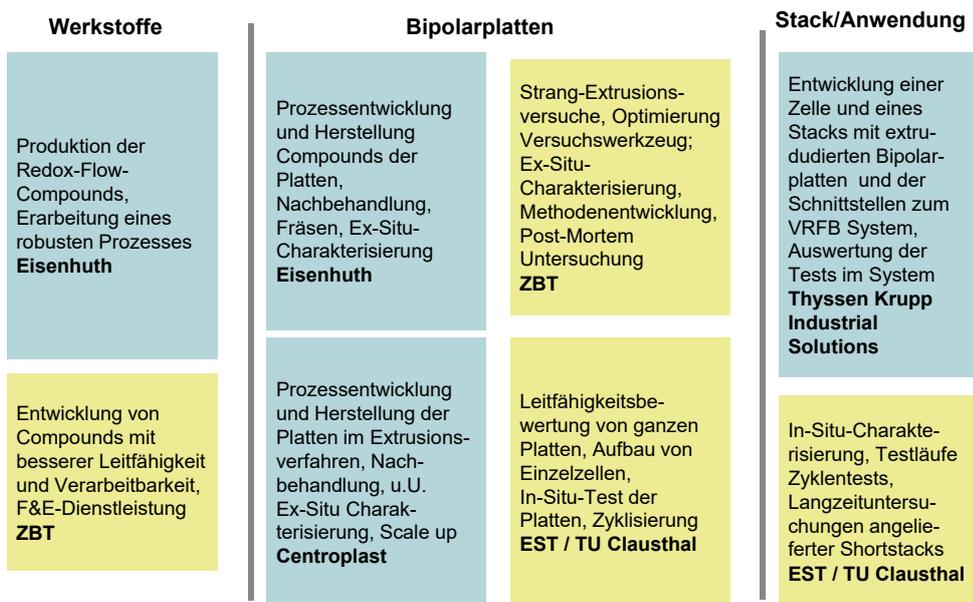


Abbildung 1: Übersicht der Aufgabenteilung im Konsortium

or stacks in tanks and is pumped through the cells during operation. There the charging and discharging reactions take place at the electrodes, which are mostly porous carbon materials. Typically, in the cells graphite compound bipolar plates are used as current collectors, which have both a high resistance to the usually highly corrosive electrolyte and a good conductivity. In order to be able to produce the required storage capacity in the kW or MW range, the number of cells can be increased and also the actual cell area up to 2 m<sup>2</sup> by scale-up. However, such large compound bipolar plates cannot be produced economically using conventional manufacturing processes such as injection moulding or hot pressing. Therefore, in this project, a new extrusion process was developed that enables continuous extrusion of the bipolar plates. Extensive investigations, both ex- and in-situ, ensured that the new plates have a comparable quality to conventionally produced plates. As the flow distribution of the electrolyte within the porous electrode is important for such large cell area, the influence of the electrode and of different flow fields on the electrolyte distribution and also the cell performance were investigated in this project. Following this successful project, the direct following-up project Re<sup>3</sup>dOx has started in September 2019. In this project, the recycling potentials and paths for vanadium redox flow batteries are investigated.

## Projekthintergrund

Die zunehmende Integration erneuerbarer Energien in die bestehenden Stromnetze erschwert deren Regelbarkeit, was die Bereitstellung einer ständigen, ununterbrochenen Energieversorgung immer unsicherer macht. Abhilfe kann hier nur durch den Ausbau von Speichertechnologien erfolgen. 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.

Bei einer Redox-Flow-Batterie besteht das aktive Material aus in einem flüssigen Elektrolyten gelösten Salzen. Redox-Flow-Batterien arbeiten mit einem Elektrolyttank für jede der

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Neuartige großflächige Bipolarplatten im Extrusionsverfahren für Redox-Flow-Batterien

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03ET6050D

### Laufzeit

01.11.2015–31.04.2019

### Projektleiter:

Prof. Thomas Turek  
Prof. Ulrich Kunz

### Projektbearbeiterinnen:

Isabelle Kroner, M.Sc.  
Eva Prumbohm, M.Sc.



Thomas Turek



Ulrich Kunz



Isabelle Kroner



Eva Prumbohm

beiden Elektrodenseiten. Beim Lade- und Entladeprozess wird die Oxidationsstufe der gelösten Ionen des Salzes geändert. 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.

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 bzw. 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 Lithium-Ionen-Batterien liegt.

## Projektziele

Ziel dieses Projekts war die Entwicklung neuartiger Bipolarplattenwerkstoffe zur Herstellung von großflächigen Bipolarplatten für Vanadium-Redox-Flow-Batterien (VFB), sowie des dazu notwendigen neuen Herstellungsverfahrens. Die Rolle der Projektpartner und deren Beiträge in den verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette sind in Abbildung 1 dargestellt. Angestrebt wurden Plattengrößen von mindestens 1 m<sup>2</sup>, wobei die Fläche optimaler Weise 2 m<sup>2</sup> bis 3 m<sup>2</sup> betragen sollte. Technisches Ziel war es daher eine Bipolarplatte zu entwickeln, welche trotz dieser besonderen Größe eine optimierte Dicke bei noch hinreichend mechanischer Stabilität sowie Gasdichtigkeit aufwies, und dabei gleichzeitig die Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit erfüllte. Insbesondere wegen den hohen mechanischen Anforderungen war eine auf die Anwendung abgestimmte Bipolarplatte Ziel der Entwicklung. Dabei war zu berücksichtigen, dass Bipolarplatte und System in enger Wechselwirkung miteinander stehen. Dieser Zielsetzung zufolge wurden substantiell höhere Anforderungen an die Materialien, Fertigungstechnik, Toleranzen sowie die Stackentwicklung gestellt, als es bisher bei Platten mit einer aktiven Fläche in der Größenordnung von DIN A4 der Fall war. Diese Hochskalierung der Fläche war deshalb nicht durch ein simples „Vergrößern“ der bereits etablierten Prozesse (Heißpressen, Spritzgießen) zu erreichen, son-

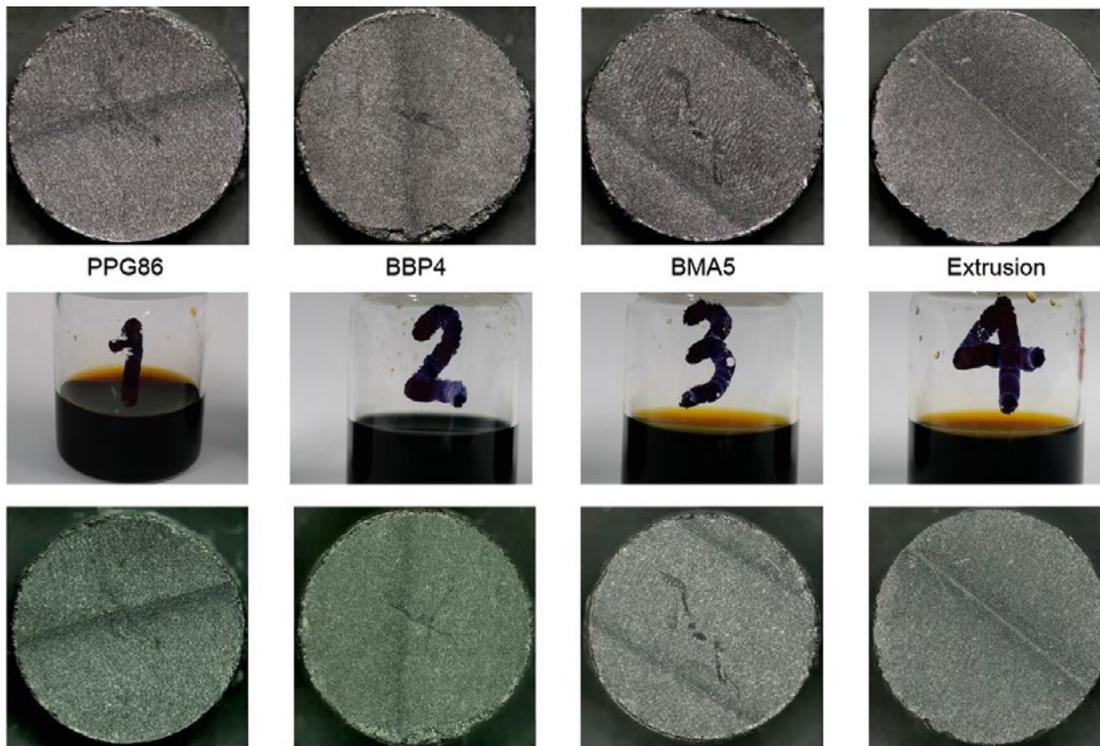


Abbildung 2: Probenkörper von vier Materialien vor Auslagerung (oben), ausgelagert (Mitte) und nach Auslagerung (unten)

den erforderte für die Bipolarplatte und ihre Compounds eine substantiell erneuerte Fertigungstechnik über ein Extrusionsverfahren. Es wurden die Potentiale herausgearbeitet, welche eine einfache, designoptimierte und auch kostengünstige Fertigung großer Bipolarplatten für Redox-Flow-Batterie erlauben. „Designoptimiert“ bedeutet in diesem Fall, dass auch das Flow-Field-Design hinsichtlich der Besonderheiten des Fertigungsverfahrens ausgelegt wurde.

## Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde sowohl ein Leitfähigkeits-Mapping neuer Materialien als auch neuer Bipolarplatten durchgeführt. Zusätzlich zur Leitfähigkeitsuntersuchung der unbelasteten Platten wurden die Proben auch hinsichtlich ihrer chemischen und elektrochemischen Beständigkeit untersucht. Zur Untersuchung der chemischen Beständigkeit wurden aus den entsprechenden Materialien runde Probenkörper ( $\varnothing = 13 \text{ mm}$ ) gefertigt, die dann in hochkorrosivem positivem Vanadiumelektrolyt mit einem Ladungszustand von 100 % ausgelagert wurden. Die Verwendung des vollständig aufgeladenen positiven Elektrolyten stellte sicher, dass die Probenkörper der höchstmöglichen Belastung ausgesetzt waren, da nur noch

das stark oxidierend wirkende Vanadium(V) im Elektrolyten vorlag. Eine mögliche Oxidation des Probenmaterials führt zu einer Reduktion der V(V)- zu V(IV)-Ionen, die sich durch einen Farbumschlag der Flüssigkeit (von gelb-braun zu grünlich) sehr deutlich zeigt. Zusätzliche optische Untersuchungen mit einem Digitalmikroskop wurden genutzt, um die Probenkörper auf Veränderungen des Materials durch die Auslagerung zu untersuchen. In Abbildung 2 sind beispielhaft die Probenkörper von vier Materialien, davon drei herkömmliche Materialien und ein Extrusionsmaterial, dargestellt.

Zudem wurde ein Verfahren entwickelt, welches die Leitfähigkeitsmessung bzw. die Qualitätsuntersuchung der Platten während der Extrusion erlaubt. Hierfür wurde ein Wirbelstromsensor auf seine Eignung hin untersucht. Diese Sensoren werden verbreitet in der Stahlbandherstellung zur Dickenkontrolle eingesetzt. Das Messprinzip beruht auf der Induktion eines Wirbelstroms innerhalb des untersuchten Materials, der sich je nach Materialdicke und -leitfähigkeit sowie Abstand des Sensors verändert. Zum Testen des Sensors wurden Platten mit bewusst eingebrachten Störungen (Kunststoffpartikel, Metallspäne etc.) eingesetzt. Die Fehlerproben konnten dann mittels herkömmlichem Leitfähigkeitsmapping sowie dem Wirbelstromsensor

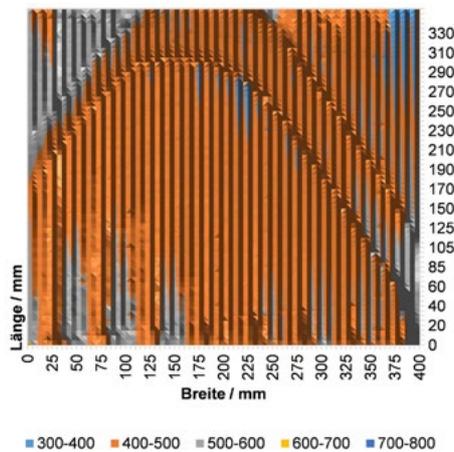


Abbildung 3: Leitfähigkeitsmapping (links) von extrudierter Platte mit Materialwechsel (rechts)

untersucht und die erhaltenen Daten verglichen werden. Hier zeigte sich, dass der Wirbelstromsensor in der Lage ist, starke Störungen sehr deutlich und zum Teil sogar zuverlässiger als das herkömmliche Messprinzip zu erkennen. In Abbildung 3 ist ein mit dem Wirbelstromsensor aufgenommenes Leitfähigkeitsmapping einer extrudierten Platte mit Materialwechsel dargestellt. Das durch die Compoundänderung aufgetretene parabolische Profil konnte vom Sensor qualitativ sehr gut abgebildet werden. Eine quantitative Angabe der Leitfähigkeit kann aufgrund der vielen Einflussfaktoren vom Sensor noch nicht geliefert werden, die angegebenen Zahlen sind daher nur qualitativ zu sehen. Anschließend erfolgte eine erste Integration des Sensors in die Extrusionslinie beim Projektpartner.

Für weitere Materialtests wurden Einzelzellen aufgebaut, siehe Abbildung 4. In diesen wurden Materialien ausführlich getestet. Dazu wurde eine standardisierte Testmethode entwickelt, sodass die Ergebnisse der Materialien untereinander vergleichbar sind. Dazu wurde zunächst Standardelektrolyt eingefüllt, der

auf einen Ladungszustand von 100 Prozent aufgeladen wurde. Anschließend wurde eine Strom-Spannungskennlinie aufgenommen. Danach folgten 50 Lade-Entladezyklen (LEZ) und eine anschließende erneute Aufnahme einer Strom-Spannungskennlinie, dieser Vorgang wurde zwei Mal wiederholt, sodass sich eine Gesamtbelastung von 150 LEZ für die Materialien ergab. Zusätzlich wurden vor und nach den Zyklen Impedanzspektren der Zelle aufgenommen, um die Veränderung des ohmschen Zellwiderstands durch die Belastung zu testen. Auf diese Weise konnte die Leistung der Zelle zu Beginn, mit unbelasteter Bipolarplatte, sowie die Leistungsabnahme über der Zyklenanzahl und die damit verbundene Alterung der einzelnen Materialien detailliert untersucht werden.

Ergänzend zu den experimentellen Arbeiten wurde modellbasiert die Eigenschaften großer Zellen bzw. großer Elektroden-/Platten untersucht. Dies war vor allem deshalb erforderlich, da durch das tatsächliche Scale-Up einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie, also die Vergrößerung der aktiven Zellfläche, der Druckverlust auf



Abbildung 4: Parallelisierte Materialuntersuchungen mit Einzelzellen mit 10 cm<sup>2</sup> akt. Fläche

Grund der Durchströmung der Zelle mit zunehmender Zellhöhe sehr stark zunimmt und weit über 10 bar erreichen kann. Dadurch ist es nicht mehr möglich, die Vlies-Elektrode in einer Zelle mit geringen Spaltmaßen im Elektrolytspalt im flow-through-Design zu durchströmen. Bei gleichen Bedingungen tritt im flow-by-Design mit einem in die Bipolarplatte integrierten Strömungsfeld eine Druckdifferenz von unter 0,5 bar auf. Der Einsatz von Strömungsfeldern, welche bestenfalls extrudierbar sein sollten, ist daher zwingend erforderlich. Hierbei ergibt sich aber die Einschränkung, dass extrudierbare Strömungsfelder mit der Extrusionsrichtung eingebracht werden müssen und damit bei der finalen Plattengröße quer zur Durchströmungsrichtung vorliegen.

Als besonders vielversprechend erwies sich das interdigitale Strömungsfeld-Design, welches den Druckverlust reduziert und gleichzeitig einen Elektrolytdurchgang durch die Elektrode erzwingt, siehe Abbildung 5. Die Größe des Druckverlustes hängt neben der Gestalt des Strömungsfeldes auch von den Elektroden- und Elektrolyteigenschaften sowie dem Volumenstrom ab. Entsprechend des Darcy-Gesetzes bzw. der Forchheimer-Gleichung spielen hierbei hinsichtlich der Vlies-Elektrode der vorliegende Kompressionsgrad, die Porosität und die Permeabilität eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe von verschiedenen mathematischen Modellen wurden diese Zusammenhänge untersucht und quantifiziert.

Zudem wurde der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit der Bipolarplatten untersucht. Konkret wurde hierbei quantifiziert, welche Auswirkung eine Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit der Bipolarplatte auf den Widerstand der gesamten Zelle und damit auf den Wirkungsgrad unter Berücksichtigung aller Zellkomponenten hat.

### Nachfolgeprojekt Re<sup>3</sup>dOx – Recycling und Ressourceneffizienz bei der RedOx-Flow-Batterie

Nach erfolgreichem Abschluss des beschriebenen Projekts wurde zum 01.09.2019 das Nachfolge-Verbundvorhaben Re<sup>3</sup>dOx mit einer bewilligten Fördersumme von knapp 3,3 Millionen Euro gestartet. Mit einem leicht veränderten Konsortium liegt in diesem Projekt der Schwerpunkt auf dem Erkennen und Realisieren von Recycling-Potentialen der Redox-Flow-Komponenten. Dadurch sollen sowohl Ressourcen geschont, aber auch eine Versorgungssicherheit sowie eine generelle Kostensenkung der Technologie erreicht werden. Im Teilprojekt „In-Situ-Charakterisierung neuer und recycelter Materialien und Nachhaltigkeitsbewertung“ der TU Clausthal (Förderkennzeichen 03ET6156E) sind dabei zum einen die experimentelle Charakterisierung von recycelten Materialien sowie zum anderen die modellbasierte Bewertung der Recycling-Potentiale auf Basis einer Lebenszyklusbetrachtung (LCA, Life-Cycle-Analysis) Schwerpunktthemen der Forschungsarbeit.

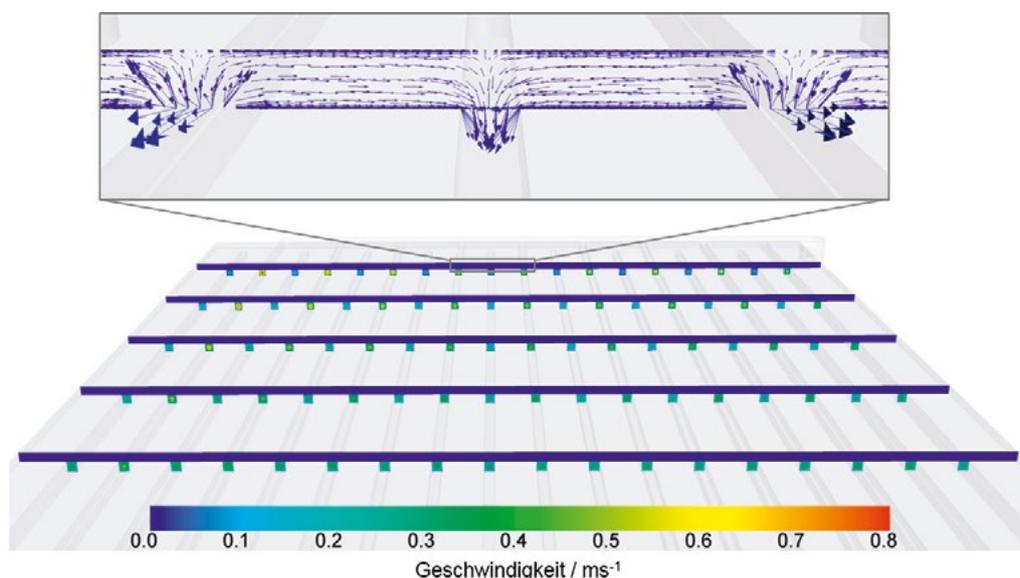


Abbildung 5: Geschwindigkeitsverteilung in Kanälen und der Elektrode für interdigitales Strömungsfeld-Design

# ENERA: Weiterentwicklung des Strommarktdesigns

## Kurzfassung

Die Umstellung des Elektrizitätsversorgungssystems auf überwiegend erneuerbare Energien erhöht einerseits die Gefahr von Netzengpässen soll andererseits aber zur Verminderung der Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren beitragen. Dies stellt die bestehende Netzinfrastruktur vor Herausforderungen, die Stromerzeugung erfolgt zunehmend dezentral und ist räumlich von den großen Verbrauchszentren entkoppelt. Die veränderten Lastflüsse und der insgesamt steigende Transportbedarf in den Stromnetzen führen häufiger zu Netzengpässen. Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist es zudem erforderlich, Strom in Sektoren einzusetzen, die bislang primär fossile Primärenergieträger nutzen. Diese Sektorenkopplung erfordert nicht nur eine erhöhte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, sondern auch eine bessere Einbindung von Elektrizität in anderen Sektoren, insbesondere in den Bereichen Wärme und Verkehr. Das vom BMWi geförderte Projekt „enera“ demonstriert hierzu als Reallabor Lösungsansätze im Nordwesten Deutschlands. Im vom BMBF geförderten Projekt „ESYS“ der Wissenschaftsakademien erarbeitet eine Arbeitsgruppe politische Handlungsoptionen für ein Marktdesign, mit dem sich die Umbrüche im Energieversorgungssystem besser bewältigen lassen.

## Abstract

The reorientation of electricity supply towards renewable energy sources increases the risk of network congestion on the one hand and should on the other hand support the reduction of greenhouse gas emissions in other sectors. This proves to be a challenge for the grid infrastructure as electricity generation becomes more decentralized and distant from areas with high

power demand. These changes in load flows and the overall growing demand for transmission capacity increasingly lead to grid congestion. In order to meet the climate goals the use of electricity in sectors hitherto relying on fossil primary energy sources is indispensable. Sector coupling however requires not only an increased generation of power from renewable sources but a better integration of electricity in other sectors, in particular heating and traffic. The “enera” project, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, demonstrates contingent approaches to meet these challenges in northwestern Germany. Policy options are articulated with funding from the Federal Ministry for Education and Research by a working group within the “ESYS” project of the Academies of Science to develop a market design fostering a further sustainable reorientation of the energy supply system.

## Engpassmanagement

Der Wandel der deutschen Elektrizitätserzeugung von zentral einspeisenden Großkraftwerken, vor allem auf Basis von Kernenergie oder Kohle, zu erneuerbarer Stromerzeugung, vor allem auf Basis von Wind, Sonne und Biomasse, hat den Bedarf an Stromtransportkapazitäten stark verändert und erhöht. Unter anderem muss Strom aus Windenergie von Norddeutschland bzw. den Offshore-Windparks zu den Verbrauchszentren in West- und Süddeutschland transportiert werden. Durch diese Entwicklungen müssen die Netzbetreiber häufiger Maßnahmen des Engpassmanagements ergreifen, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems aufrechtzuerhalten, was wiederum hohe Kosten verursacht. Das Engpassmanagement umfasst alle Maßnahmen zur Bewältigung von Situationen, in denen der Transportbedarf für Strom die Transportkapazitäten überschreitet. Ein solcher Netzengpass kann entstehen, wenn die Strombelastbarkeit der Leitungen oder sonstiger Netzbetriebsmittel überschritten wird (strombedingte Netzengpässe) oder wenn die zulässigen Spannungsbänder in einem Netzgebiet nicht eingehalten werden können (spannungsbedingte Netzeng-

## Projektpartner

- EWE AG Oldenburg (Konsortialführer), 32 Konsortialpartner und 32 assoziierte Partner

pässe). Die Netzbetreiber sind aufgrund ihrer System- bzw. Netzverantwortung verpflichtet, solche Netzengpässe zu beseitigen. Hierzu können sie entweder eigene Netzbetriebsmittel einsetzen, z.B. Netzschaltungen zur Entlastung von Leitungen vornehmen, oder aber die Stromeinspeisung oder -entnahme durch Erzeugungs-, Verbrauchs- oder Speicheranlagen dritter Marktteilnehmer verändern, etwa durch den Einsatz von ab- und zuschaltbaren Lasten.

## Sektorenkopplung

Durch den verstärkten direkten oder indirekten Einsatz von erneuerbar erzeugtem Strom in Bereichen, die bisher primär auf fossile Energieträger angewiesen sind, soll ein substanzieller Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und damit zur Erreichung der Klimaziele geleistet werden. Strom aus erneuerbaren Energien wird insbesondere für die Energiebereitstellung in den Sektoren Verkehr, Wärme und industrielle Prozesse benötigt. Im Verkehrssektor lässt sich Strom im Wege der Elektromobilität direkt nutzen, im Wärmesektor ist dies z.B. mit Wärmepumpen möglich. Die indirekte Nutzung von Strom erfolgt im Falle einer zwischengeschalteten Energiewandlung, wobei technologiebedingt hohe Wirkungsgradverluste eintreten können. Vor allem kann durch Elektrolyse CO<sub>2</sub>-neutral erzeugter Strom in Wasserstoff umgewandelt und entweder direkt oder nach Zusatz von Kohlenstoff als synthetisches Methan genutzt werden (Power-to-Gas). Außerdem lassen sich auf dieser Basis synthetische Kraftstoffe herstellen (Power-to-synthetic-Fuels). Neben der dadurch erzielten Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den anderen Sektoren ermöglicht eine solche Sektorenkopplung auch die Erschließung neuer Flexibilität für die Stromnetze. Insbesondere können überschüssige Strommengen, etwa aus Windenergieanlagen, in anderer Form genutzt oder gespeichert werden.

## Ausgewählte Projektergebnisse SINTEG-Projekt „enera“

Das Projekt „Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft“ ist Teil des vom BMWi im Rahmen der SINTEG-Ausschreibung („Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“) geförderten Verbundprojekts „enera“. Der Bearbeitungszeitraum umfasst die Jahre 2017–2020. Das Teilprojekt wird von Prof. Dr. Hart-

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

ENERA – Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für  
Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03SIN307

### Projektlaufzeit:

01.01.2017–31.12.2020

### Berichtszeitraum:

01.01.2018–31.12.2019

### Projektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

### Projektbearbeiter:

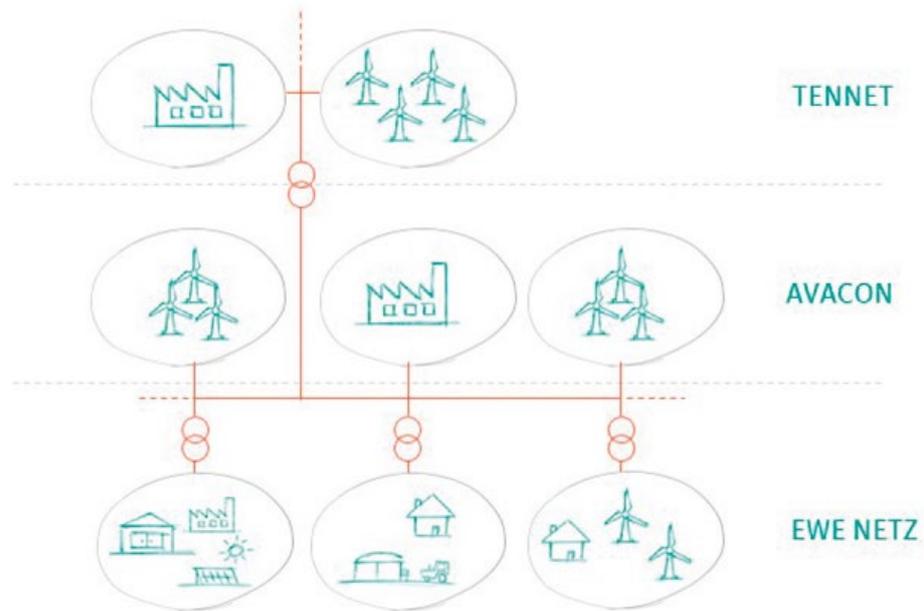
Dipl.-Jur. Thore Iversen



Hartmut Weyer



Thore Iversen



Übersicht über die Netzebenen und die beteiligten Netzbetreiber im enera-Gebiet.  
Quelle: enera-Projekt, Herrmann et. al., Netzpraxis 11-12/2018, S. 51, 53

mut Weyer, Direktor des Instituts für deutsches und internationales Berg- und Energierecht der TU Clausthal, geleitet. Das Demonstrationsvorhaben „enera“ wird von 32 Konsortialpartnern unter Führung der EWE AG sowie weiteren 32 assoziierten Partnern durchgeführt und versteht sich als Reallabor für die künftige Gestaltung der Energiewende in Deutschland. Die „enera“-Modellregion umfasst die Landkreise Aurich, Friesland und Wittmund sowie die kreisfreie Stadt Emden und ist als nordwestliche Küstenregion stark von der Onshore- und Offshore-Windenergieerzeugung geprägt.

Das Verbundprojekt entwickelt und demonstriert neue Ansätze der Netzbetriebsführung durch einen intelligenten Netzregler, einen eigenen Markt für regionale Flexibilitätsprodukte und die Anpassung des Elektrizitätsversorgungsnetzes an eine steigende Anzahl von dezentralen Erzeugungs- und Verbrauchseinrichtungen sowie Speichern. Die Entwicklung innovativer Lösungen für die weitere Energiewende und die Digitalisierung der Energieversorgungssysteme wirft eine Vielzahl juristischer Fragen auf, die in enger Abstimmung mit den Projektpartnern aus Wirtschaft und Wissenschaft bearbeitet werden. Aus den energiewirtschaftsrechtlichen Untersuchungen werden Vorschläge für die künftige Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens der Energiewirtschaft abgeleitet. Die Projektstätigkeit

muss laufend neue rechtliche Rahmenbedingungen berücksichtigen, auf deutscher Ebene etwa das Gesetz zur Beschleunigung des Energieleitungsbaus (sog. NABEG 2.0), auf Ebene des europäischen Unionsrechts etwa die Rechtsakte des Pakets „Saubere Energie für alle Europäer“.

Im Rahmen des Projekts erfolgte zunächst eine grundlegende Analyse des geltenden Energiewirtschaftsrechts zum Verhältnis von Netzbetrieb und Energiemarkt. Im Berichtszeitraum standen hierbei die Anerkennung der Kosten des Netzbetriebs nach der Anreizregulierungsverordnung und die Analyse von rechtlichen Spielräumen zur Regionalisierung der Elektrizitätsversorgung im Fokus. Anschließend wurden Möglichkeiten zur weiteren rechtlichen Ausgestaltung untersucht. Insbesondere wird im Verbundprojekt zur Vermeidung und Behebung von Netzengpässen ein regionaler Flexibilitätsmarkt entwickelt, auf dem gegen Vergütung Anpassungen der Einspeisung oder Entnahme durch Erzeugungsanlagen, zu- und abschaltbare Lasten sowie Speicher angeboten werden können. Hierdurch sollen Stromangebot und -nachfrage flexibilisiert und so die Abregelung von Windenergieanlagen vermieden werden. Die freiwillige Marktteilnahme soll darüber hinaus zu einer aktiveren Bereitstellung von Flexibilität anregen. Diese steht nicht nur zur Beseitigung von Netzengpässen im Vertei-

lernetz, sondern auch im Übertragungsnetz zur Verfügung. Die rechtlichen Umsetzungsmöglichkeiten und deren Grenzen wurden einerseits in Bezug auf die geltende Rechtslage untersucht, andererseits unter Berücksichtigung der Experimentierklauseln der SINTEG-Verordnung, die für das enera-Projekt besondere Freiräume eröffnet. Bewertet wurden zudem die kommenden Änderungen des Rechtsrahmens aufgrund der neuen EU-Strombinnenmarktverordnung sowie der Novellierung von Energiewirtschaftsgesetz und Erneuerbare-Energien-Gesetz.

Speziell untersucht wurde außerdem die rechtliche Zulässigkeit des Einsatzes eines elektrischen Gasverdichters als Flexibilität. Gasverdichter, die beim Pipelinetransport von Gas erforderlich sind, um strömungsbedingte Druckverluste auszugleichen, können entweder durch Gasturbinen oder elektrisch angetrieben werden. Bei Verfügbarkeit beider Varianten in einer Verdichterstation kann der elektrische Verdichter als Flexibilität für das Stromnetz genutzt werden. Betrachtet wurden in diesem Zusammenhang insbesondere die Grenzen der Bereitstellung von Engpassmanagement-Dienstleistungen durch Gasnetzbetreiber im Hinblick auf die Entflechtungsvorschriften des Energiewirtschaftsgesetzes sowie die Kostenanerkennung nach der Anreizregulierungsverordnung.

Einen weiteren Schwerpunkt des Projekts bildete die praktische Umsetzung der sog. Spitzenkappung als neuem Instrument der Netzplanung. Netzbetreiber dürfen bei der Netzplanung eine Ausfallarbeit von bis zu drei Prozent einer Onshore-Windenergie- oder Solaranlage berücksichtigen, d.h. die Netzkapazität muss nicht für Spitzenlasten von wenigen Stunden im Jahr ausgebaut werden. Hierdurch werden die Netzausbaukosten deutlich reduziert, wobei allerdings Netzengpässe in Kauf genommen werden müssen. Zur Operationalisierung der Spitzenkappung wurden die Anforderungen an einen Netzregler untersucht, der die Steuerung der Erzeugungsanlagen automatisiert. Diesbezüglich wurden die gesetzlichen Anforderungen des Einspeisevorrangs aus erneuerbaren Energieanlagen und die Vorgaben zur Fernsteuerbarkeit dieser Anlagen untersucht.

### Arbeitsgruppe „Strommarktdesign“ im ESYS-Projekt der Wissenschaftsakademien

Mit dem Projekt „Energiesysteme der Zukunft (ESYS)“ wollen acatech – Deutsche Akademie

der Technikwissenschaften, die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften Impulse für die Debatte über Herausforderungen und Chancen der Energiewende in Deutschland geben. Rund 100 Fachleute aus Wissenschaft und Wirtschaft erarbeiten hier Handlungsoptionen zur Umsetzung einer sicheren, bezahlbaren und nachhaltigen Energieversorgung. Im Rahmen des ESYS-Projekts untersucht die Arbeitsgruppe „Strommarktdesign“ zwei Schwerpunktthemen: Handlungsoptionen sollen zum einen zur Gestaltung des regulatorischen Rahmens für die Sektorenkopplung, zum anderen zur Bewältigung von Netzengpässen entwickelt werden. Die Arbeitsgruppe wird geleitet durch Prof. Dr. Felix Müsgens (BTU Cottbus-Senftenberg) und Prof. Dr. Hartmut Weyer (TU Clausthal).

#### 1) Marktdesign für die Sektorenkopplung

Um die nationalen und internationalen Klimaschutzziele erreichen zu können, bedarf es einer Verknüpfung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen muss Strom aus erneuerbaren Energiequellen auch vermehrt in den anderen Sektoren zum Zuge kommen. Hierzu sollte ein möglichst unverzerrter Wettbewerb der Energieträger geschaffen werden, um eine wirtschaftlich effiziente Emissionsreduktion zu erzielen. Im gegenwärtigen Marktdesign sind die Energieträgerpreise jedoch durch Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen unterschiedlich stark belastet. Besonders stark verteuert wird Strom. Beim Haushaltsstrompreis etwa machen Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen mehr als Hälfte des Gesamtpreises aus. Diese zumeist fix ausgestalteten Preisbestandteile dämpfen zudem Knappheitssignale und hindern Marktakteure, auf Überschüsse oder Engpässe zu reagieren. Darüber hinaus spiegeln die Preissignale nicht die tatsächlichen Knappheiten bezogen auf ihre Umweltauswirkungen (insbesondere Klimaschäden) wider. So ist die Belastung durch die ökologische Steuerreform für Kraftstoffe im Verkehrssektor hinsichtlich der klimarelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen ungefähr dreimal so hoch wie für Erdgas im Wärmemarkt.

#### Projektpartner

- Prof. Dr. Felix Müsgens  
(BTU Cottbus-Senftenberg)

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**

Arbeitsgruppe Strommarktdesign im Projekt ESYS – Energiesystem der Zukunft

**Fördermittelgeber:**

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Förderkennzeichen:**

EDZ2016

**Projektlaufzeit:**

01.06.2018–31.12.2019

**Berichtszeitraum:**

01.06.2018–31.12.2019

**Projektleiter:**

Prof. Dr. Hartmut Weyer

**Projektbearbeiter:**

Dipl.-Jur. Sebastian Buchholz



Hartmut Weyer



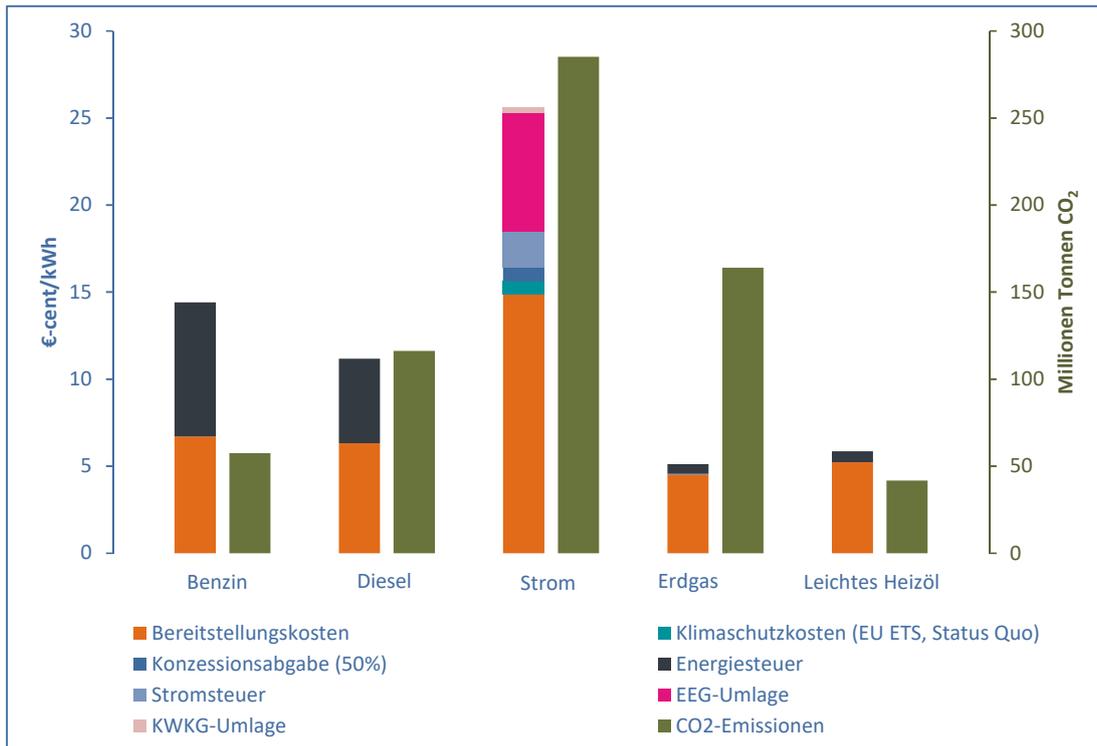
Sebastian Buchholz

Um die klimapolitischen Ziele auf effizientem Weg sektorenübergreifend erreichen zu können, bedarf das gegenwärtige Strommarktdesign einer Überarbeitung, die sich auch auf den Wärme- und den Verkehrsbereich auswirkt. Dabei sollte sichergestellt werden, dass der Preis jedes Energieträgers seine Bereitstellungskosten (z.B. für Gewinnung, Aufbereitung, Transport, Handel und Vertrieb) korrekt widerspiegelt. Wesentlicher Leitgedanke einer Neugestaltung des Marktdesigns ist zudem die Bewertung von Energieträgern bezogen auf ihre umweltschädigende Wirkung. Unter Effizienzgesichtspunkten ist dabei grundsätzlich eine einheitliche CO<sub>2</sub>-Bepreisung anzustreben, da es im Hinblick auf die Klimaschutzziele keinen Unterschied macht, aus welchem Sektor eine bestimmte Menge CO<sub>2</sub> emittiert wird. Schließlich muss geklärt werden, in welchem Umfang die einzelnen Energieträger auch einen Beitrag zur Finanzierung öffentlicher Aufgaben leisten sollen, insbesondere durch Erhebung von Energieverbrauchssteuern. Im Ergebnis sollte das Marktdesign einen möglichst unverzerrten Wettbewerb zwischen den Energieträgern über alle Sektoren hinweg ermöglichen (level playing field).

### 2) Marktdesign für das Engpassmanagement

Netzengpässe werden voraussichtlich auch im Jahr 2030 noch in erheblichem Umfang bestehen. Die voranschreitende Sektorenkopplung spielt hierbei eine wichtige Rolle: Die zu erwartende Steigerung an lastseitiger Netznutzung durch sektorenübergreifende Stromanwendungen wie Wärmepumpen und E-Mobilität erfordert einen erheblichen Zubau an Stromerzeugung, der zu einem großen Anteil mit Hilfe von fluktuierender Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden muss. Darüber hinaus wird die Weiterentwicklung des Binnenmarktes für Elektrizität auf europäischer Ebene vorangetrieben, sodass zukünftig mit erhöhten grenzüberschreitenden Stromflüssen zu rechnen ist. Die Bewältigung von Netzengpässen bleibt daher eine Herausforderung für die Sicherheit, Preisgünstigkeit und Umweltverträglichkeit der Stromversorgung. Vor diesem Hintergrund prüft die Arbeitsgruppe geeignete Mechanismen für das Engpassmanagement.

Nach einer Analyse des derzeitigen Rahmens werden Möglichkeiten für eine zukünftige Anpassung des Marktdesigns im Hinblick auf ihre Vor- und Nachteile untersucht. Änderungen des Marktdesigns können grundsätzlich an zwei unterschiedlichen Stellen ansetzen. Sie



Linke Achse: Durchschnittliche Endverbraucherpreise für ausgewählte Energieträger, aufgeteilt nach Bereitstellungskosten und den verschiedenen Steuern, Abgaben und Umlagen (Stand 2018). Die Abbildung bezieht sich auf die Endverbraucherpreise für private Haushalte, Ausnahmetatbestände sind hier nicht berücksichtigt. Rechte Achse (und grüne Balken): CO<sub>2</sub>-Emissionen der Energieträger im Jahr 2018 (Strom: 2017). Die Angaben für Erdgas beinhalten ausschließlich Mengen, die nicht im Bereich der Stromerzeugung angefallen sind. Quelle: ESYS-Projekt, Arbeitsgruppe Strommarktdesign

können einerseits Einfluss auf die Einsatzentscheidungen von Anlagenbetreibern, insbesondere Kraftwerksbetreibern, nehmen (sog. Dispatch). In diesem Fall wird die Gefahr von Netzengpässen von vornherein verringert, indem ein engpassfördernder Anlageneinsatz vermieden wird. In Betracht kommt etwa die Einführung eines Knotenpreissystems, bei dem die Einsatzentscheidungen unter Berücksichtigung von Netzengpässen getroffen werden. Denkbar wäre auch eine Aufspaltung der bislang einheitlichen deutschen Preiszone entlang struktureller Netzengpässe, wobei die Transportmengen zwischen unterschiedlichen Strompreiszonen begrenzt würden, sodass sich ggf. unterschiedliche Strompreise in unterschiedlichen Strompreiszonen bilden würden. Schließlich könnte auch erwogen werden, die Entgelte für die Stromnetznutzung in Abhängigkeit von der Netzauslastung zu bemessen, sodass engpassbelastete Teile des Netzes aufgrund höherer Kosten weniger in Anspruch genommen werden.

Andererseits werden Änderungen des Marktdesigns in Bezug auf korrigierende Eingriffe der Netzbetreiber in die Dispatch-Entscheidungen für die einzelnen Anlagen untersucht (sog. Redispatch). Redispatch-Maßnahmen müssen durch die Netzbetreiber ergriffen werden, wenn die eingereichten Anlagenfahrpläne und sonstige Prognosen das Entstehen eines Netzengpasses erkennen lassen oder ein Netzengpass bereits aufgetreten ist. Im Ergebnis findet eine Anpassung der Einspeisung und / oder des Bezugs der Anlagen statt, um den Netzengpass zu entlasten. Änderungen des Marktdesigns können darauf abzielen, den Netzbetreibern größere Spielräume für die marktbasiertere Beschaffung von Flexibilität für das Engpassmanagement einzuräumen, insbesondere durch Schaffung regionaler Flexibilitätsmärkte. Darüber hinaus werden Möglichkeiten untersucht, die regulierte Beschaffung von Flexibilität für das Engpassmanagement effizienter zu gestalten, z.B. durch eine verstärkte Einbeziehung verbrauchsseitiger Flexibilität.

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

## Kurzfassung

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. Dazu wird ein hochtemperaturstabiler, resonanter Gassensor entwickelt, mit dem gravimetrische und elektrische Eigenschaftsänderungen von Metalloxid-Sensorschichten bestimmt werden können, um die Selektivität der Gasetektion zu erhöhen.

## Abstract

The aim of the project "Concentration-dependent industrial furnace control" is the development of a technology that enables energy-efficient control of electrically powered thermal processes. The control is based on the measurement of the gas composition in the furnace. For this purpose, a high-temperature stable, resonant gas sensor is developed, which enables the determination of gravimetric and electrical property changes of metal oxide sensor layers

### Projektpartner

- Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST)
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)

### Externe Partner:

- Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
- SGL Carbon GmbH
- Element 22 GmbH
- MUT Advanced Heating GmbH

in order to increase the selectivity of the gas detection.

## 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 Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) 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 (1.150 °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,

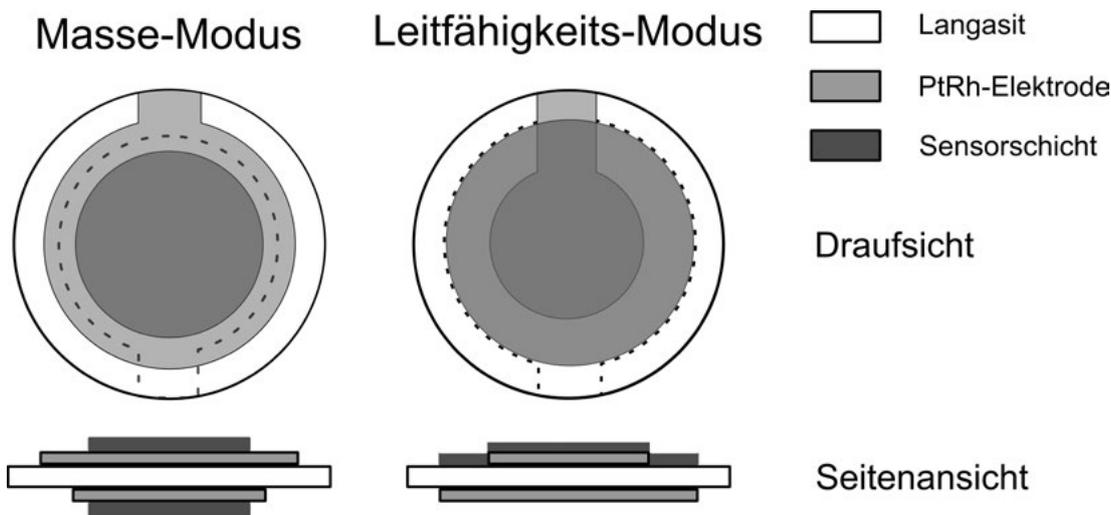


Abbildung 1: Schichtfolge zur Unterscheidung der Änderung mechanischer (Masse-Modus; links) und elektrischer (Leitfähigkeitsmodus; rechts) Schichteigenschaften zur Selektivitätssteigerung in der Gassensoren.

um den Konzentrationsverlauf prozessspezifischer Schlüsselgasspezies überwachen zu können. Aus diesem Grund soll ein Sensorprinzip zum Einsatz kommen, welches die Selektivität metalloxydbasierter Gassensoren erhöht, indem 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 Kantagasit- ( $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ ) Substrate in Frage, die zu Dickenschwingungen 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 Resonanzfrequenz  $f_R$  bezeichnet. Sie ist im Allgemeinen von der Temperatur und von der Massenbeladung abhängig. Die zeitabhängige Messung der Resonanzfrequenz erlaubt es, Änderungen der Sensorschichten auszuwerten und auf 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 Massenbeladung, z.B. 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 über die Probenfläche. Die Masse der Elektroden wirkt sich bei verbreitertem Elektrodendurchmesser stärker auf die Schwingung aus.

## Bisherige Forschungstätigkeiten

### Auswahl der 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 Schlüsselgase und Temperaturbereiche müssen die oxidischen Sensorschichten ausgewählt werden.

Die Metalloxide Zinnoxid ( $\text{SnO}_2$ ), Titanoxid ( $\text{TiO}_2$ ) und Praseodymdotiertes Ceroxid ( $\text{Pr}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_2$ ) wurden im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche als geeignete Kandidaten

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

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

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03ET1467B

### Laufzeit des Vorhabens:

01.12.2016 – 30.11.2020

### Berichtszeitraum:

01.12.2016 – 30.06.2019

### Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Clausthal

### Ausführende Stelle:

Forschungszentrum  
Energiespeichertechnologien

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

### Projektkoordinator:

Sebastian Schröder, M.Sc.  
E-Mail:sebastian.schroeder@tu-clausthal.de

### Internet:

[www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=422259&v=10&q=KonAIR](http://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=422259&v=10&q=KonAIR)



Holger Fritze

zur Detektion der Schlüsselgase ausgewählt. Die Sensorschichten wurden im Rahmen von Laboruntersuchungen und Tests bei externen Partnern charakterisiert.

### Massenänderung dünner Praseodymdotierter Ceroxid-Schichten in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes:

Praseodymdotiertes 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 ergeben, sind mittels Kantagasit-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  $700^\circ\text{C}$ .

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 Messdaten zeigen eine gute Übereinstimmung mit Literaturdaten. Der Vorteil der Mikrogravimetrie ist, dass die Bestimmung des Sauerstoffdefizites unabhängig von den Defektreaktionen erfolgen kann.

### Detektion von Methan-Ethen-Gasgemischen bei hohen Temperaturen:

Im Labormaßstab durchgeführte Untersuchungen deuten darauf hin, dass mit  $\text{TiO}_2$ - und  $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_2$ -Sensorschichten Gasgemischungen aus Methan und Ethen selektiv detektiert werden können. Die  $\text{TiO}_2$ -Sensorschicht wird dabei im Leitfähigkeits- und die  $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_2$ -Sensorschicht im Mikrowaage-Modus betrieben. Die Verschiebungen der Serienresonanzfrequenz  $\Delta f_R$  beider Resonatoren werden dazu gegeneinander in einem sogenanntem Kennlinienfeld (siehe Abbildung 3) aufgetragen.

Beobachtet werden Anhäufungen der Datenpunkte in Abhängigkeit der Methan- bzw. Ethenkonzentration. Aus der Verschiebung von  $\Delta f_R$  kann mit Hilfe der Kennlinienfelder auf die Konzentration von Methan und Ethen zurück geschlossen werden. Dieser Effekt wurde auch bei  $T=500^\circ\text{C}$  und  $T=700^\circ\text{C}$  beobachtet.

### Untersuchungen der Sensorschichten beim Projektpartner:

Die Sensorschichten wurden bei einem Projektpartner unter Laborbedingungen erfolgreich betrieben.

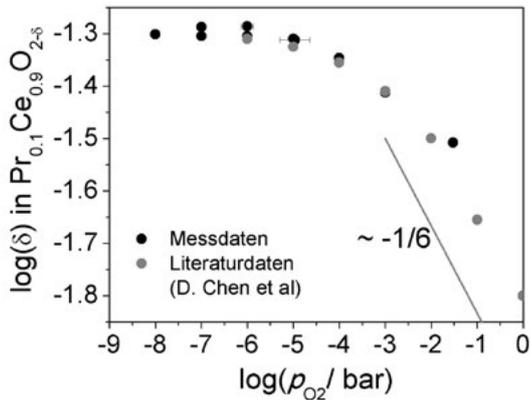


Abbildung 2: Sauerstoffdefizit  $\delta$  bei Variation des Sauerstoffpartialdrucken zwischen  $10^{-1}$  bar und  $10^{-8}$  bar für einen beidseitig mit  $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,9}\text{O}_{2,5}$  beschichteten Kantagazit-Resonator bei  $700^\circ\text{C}$ . Vereinfacht entnommen aus [ 1 ]

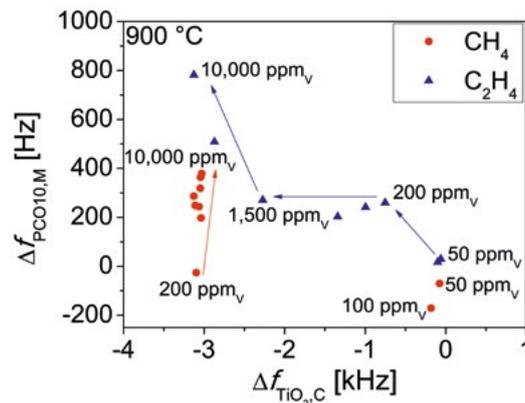


Abbildung 3: Kennlinienfeld bei  $900^\circ\text{C}$  für eine  $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,9}\text{O}_2$ -Schicht im Mikrowaage-Modus und eine  $\text{TiO}_2$ -Schicht im Leitfähigkeitsmodus [ 2 ]

$\text{TiO}_2$ - und  $\text{Pr}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_2$ -Sensorschichten, im Leitfähigkeits- bzw. Mikrowaage-Modus betrieben, werden für die Untersuchungen verwendet. Um Störeinflüsse zu identifizieren, wird stets ein zusätzlicher Referenzresonator verwendet. Zur Vermeidung katalytischer Effekte der Platinelektroden, werden die Elektroden des Referenzresonators mit Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) beschichtet.

## 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

### Gassensor zur Konzentrationsüberwachung von Methan bei Wärmebehandlungsprozessen

Sebastian Schröder, Holger Fritze  
 Proceedings 13. Sensor Symposium 2017, 28-33 (2017); DOI: 10.5162/13dss2017/1.7

### Resonant Gas Sensor for Heat Treatment Processes

Sebastian Schröder, Holger Fritze  
 Proceedings ITG-Fb 281: Sensoren und Messsysteme, 422-426 (2018);

### Thin Film Nano-Thermogravimetrie Applied to Praseodymium-Cerium Oxide Thin Films at High-Temperatures

Sebastian Schröder, Di Chen, Sean R. Bishop, Harry L. Tuller, Holger Fritze  
 Applied Physics Letters 112, 213502-213507 (2018); DOI: 10.1063/1.5025389

### Combined Conductivity and Gravimetric Resonant Gas Sensor for High-Temperature Applications

Sebastian Schröder, Holger Fritze  
 Proceedings 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 1161-1164 (2019); DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808747

### Selektive Piezoelectric Gas Sensor for Hydrocarbons

Sebastian Schröder, Alexander Strauß, Peter Quadbeck, Holger Fritze  
 Posterbeitrag Euromat 2019, Stockholm, Schweden

## Referenzen

- [ 1 ] Thin Film Nano-Thermogravimetrie Applied to Praseodymium-Cerium Oxide Thin Films at High Temperatures  
 Sebastian Schröder, Di Chen, Sean R. Bishop, Harry L. Tuller, Holger Fritze,  
 Applied Physics Letters 112, 213502-213507 (2018); DOI: 10.1063/1.5025389
- [ 2 ] Combined Conductivity and Gravimetric Resonant Gas Sensor for High-Temperature Applications  
 Sebastian Schröder, Holger Fritze  
 Proceedings 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 1161-1164 (2019); DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808747

# In-Situ-Verfahren zur Bestimmung hoher Sauerstoffdefizite in Cer-Zirkon-Mischoxiden für den Einsatz in der Abgasnachbehandlung

## Kurzfassung

Cer-Zirkon-Mischoxide ( $\text{Ce}_{1-y}\text{Zr}_y\text{O}_{2-x}$ ) sind Bestandteil des Katalysatorträgers (Washcoat) in Autoabgaskatalysatoren und dienen der Minimierung von schädlichen Verbrennungsprodukten, wie z. B. Stickoxiden. Das Ziel des Projektes ist die Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses der Defektchemie von Cer-Zirkon-Mischoxiden und deren Einfluss auf die Anwendung zur Abgasnachbehandlung in sogenannten Dreiwegekatalysatoren (TWC's). Aufgrund der reversiblen Abgabe und Aufnahme von Sauerstoff bei reinen Cer-Zirkon-Mischoxiden kann eine gezielte Abgasnachbehandlung von benzinbetriebenen Automobilen in Abhängigkeit von der Temperatur und des Sauerstoffpartialdruckes erfolgen. Bei sehr hohen Sauerstoffdefiziten besitzt reines Ceroxid ( $\text{CeO}_2$ ) eine hohe chemische Ausdehnung, welche durch eine gezielte Zumischung von  $\text{ZrO}_2$  vermindert und zusätzlich die Katalysatorstabilität im Prozess verbessert wird. Zur Entwicklung grundlegender Modelle zur Beschreibung der Nichtstöchiometrie von Cer-Zirkon-Mischoxiden werden zwei komplementäre In-Situ-Messmethoden verwendet:

1) Nanowaage mit hochtemperaturstabilen piezoelektrischen Resonatoren 2) Mikrowellencharakterisierung in einem Hohlraumresonator.

## Abstract

Ceria-zirconia solid solutions ( $\text{Ce}_{1-y}\text{Zr}_y\text{O}_{2-x}$ ) are part of the catalyst carrier (washcoat) in exhaust gas catalysts and are used to minimize harmful combustion products, e. g. Nitrogen oxides. The aim of the project is the development of a basic understanding of the defect chemistry of ceria-zirconia solid solutions and their influence on the application of exhaust aftertreatment in so-called three-way catalysts (TWC's). Due to the reversible release and uptake of oxygen in pure ceria-zirconia solid solutions, a targeted exhaust aftertreatment of gasoline-powered automobiles can be realized as a function of the temperature and the oxygen partial pressure. At very high oxygen deficiencies, pure ceria ( $\text{CeO}_2$ ) shows a high chemical expansion, which is reduced by applications of the above mentioned solid solutions with  $\text{ZrO}_2$  and, in addition, the catalyst stability in the process is improved. To develop fundamental models for describing the non-stoichiometry of ceria-zirconia solid solutions, two complementary in-situ measurement techniques are used: 1) Nano-balance using high-temperature-stable piezoelectric resonators 2) Microwave characterization in a cavity resonator.

## Projektpartner

- Carsten Steiner
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)
- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST)  
Lehrstuhl für Funktionsmaterialien- Universität Bayreuth

## Externe Partner:

- Lehrstuhl für Funktionsmaterialien  
Universität Bayreuth

## Projekthintergrund

Das Ziel des Vorhabens ist die Schaffung der materialwissenschaftlichen Voraussetzungen zur In-Situ-Analyse des Sauerstoffdefizites in Cer-Zirkon-Mischoxiden ausgewählter Zusammensetzungen. Hierfür sollen die direkte Messung des Sauerstoffdefizites mittels einer resonanten Hochtemperatur-Nanowaage (TU Clausthal) und ein indirektes mikrowellenbasiertes Verfahren (Univ. Bayreuth) realisiert werden. Dabei wird der Einfluss der elektri-

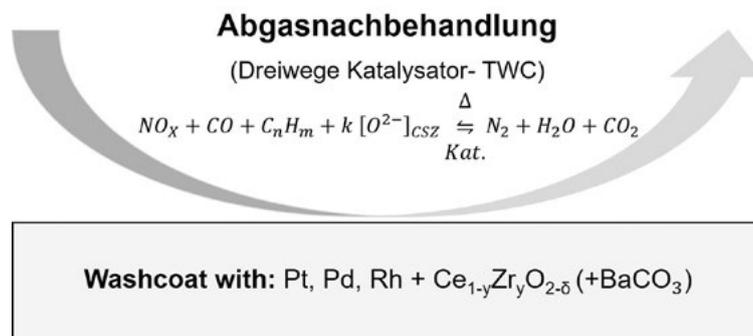


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Prozesse in einem Autoabgaskatalysators

schen und mechanischen Eigenschaften der Mischoxide auf Frequenzen und Dämpfungen genutzt. Die Messungen erfolgen bei hohen Temperaturen, bei der sich Defektgleichgewichte schnell einstellen.

Ceroxid (CeO<sub>2-x</sub>) sowie Cer-Zirkon-Mischoxide (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>) werden aufgrund ihrer strukturellen Eigenschaften in der heutigen Abgasnachbehandlung von Otto-Motoren in Dreiwegekatalysatoren (TWC) als Sauerstoffspeicher-Materialien verwendet. Cer-Zirkon-Mischoxiden (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>) sind somit Bestandteil des Katalysatorträgers (Washcoat) in Autoabgaskatalysatoren und dienen der Minimierung von schädlichen Verbrennungsprodukten, wie z.B. Stickoxiden. Die schnelle und reversible Aufnahme von Sauerstoff bei einem mageren Kraftstoff/Luft-Gemisch ( $\lambda > 1$ ) als auch die Abgabe von Sauerstoff bei einem fetten Kraftstoff/Luft-Gemisch ( $\lambda < 1$ ) bei CeO<sub>2-x</sub> ermöglicht die Dämpfung leichter Abweichungen vom idealen Kraftstoff/Luft-Gemisch ( $\lambda = 1$ ) im dynamischen Fahrbetrieb. Das Ziel des Projektes ist die Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses der Defektchemie von Cer-Zirkon-Mischoxiden (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>) und deren Einfluss auf die Anwendung zur Abgasnachbehandlung in sogenannten Dreiwegekatalysatoren (TWC's). Aufgrund der reversiblen Abgabe und Aufnahme von Sauerstoff bei reinen Cer-Zirkon-Mischoxiden (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>) kann eine gezielte Abgasnachbehandlung von benzinbetriebenen Automobilen in Abhängigkeit von der Temperatur und des Sauerstoffpartialdruckes erfolgen. Bei sehr hohen Sauerstoffdefiziten besitzt reines Ceroxid (CeO<sub>2</sub>) eine hohe chemische Ausdehnung, welche durch eine gezielte Dotierung mit ZrO<sub>2</sub> vermindert und zusätzlich die Katalysatorstabilität im Prozess verbessert wird. Zur Entwicklung grundlegender Modelle zur Beschreibung der Nichtstöchiometrie von

Cer-Zirkon-Mischoxiden (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>) werden in beiden o.g. komplementären In-Situ-Messmethoden verwendet: 1) Nanowaage mittels hochtemperaturstabilen piezoelektrischen Resonatoren 2) Mikrowellencharakterisierung in einem Hohlraumresonator.

### Nichtstöchiometrie in Sauerstoffspeichermaterialien

Die Abgabe von Sauerstoff aus CeO<sub>2-x</sub> resultiert aus der Reduktion von Ce<sup>4+</sup>-Ionen zu Ce<sup>3+</sup>-Ionen unter Bildung von Sauerstoffleerstellen (VO $\cdot$ ) bei niedrigen Sauerstoffpartialdrücken (pO<sub>2</sub>) bzw. bei einem fetten Kraftstoff/Luft-Gemisch ( $\lambda < 1$ ). Umgekehrt kann eine Aufnahme von O<sub>2</sub> durch die Oxidation von Ce<sup>3+</sup> zu Ce<sup>4+</sup> bei höheren pO<sub>2</sub> bzw. bei einem mageren Kraftstoff/Luft-Gemisch ( $\lambda > 1$ ) stattfinden. Aus der Reduktion von CeO<sub>2-x</sub> kann sich eine Nichtstöchiometrie (x), im Bereich von  $10^{-5} \leq x \leq 0,3$ , in Abhängigkeit des pO<sub>2</sub>, der Temperatur (T) und der Zusammensetzung (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>) bilden. Die Verwendung von Cer-Zirkon-Mischoxiden ergibt sich aus der Verminderung der hohen chemischen Expansion und der gleichzeitigen Steigerung des Reduktionsvermögens der Cer-Ionen.

### Messverfahren

Zur Bestimmung der Nichtstöchiometrie von Sauerstoffspeicher-Materialien, wie z. B. Cer-Zirkon-Mischoxiden (Ce<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>O<sub>2-x</sub>), werden hochtemperaturstabile piezoelektrische Resonatoren aus Ca<sub>3</sub>TaGa<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>14</sub> (CTGS)-Einkristallen (Y-Schnitt) als nanogravimetrischer Sensor eingesetzt. Die verwendeten CTGS-Resonatoren werden im Dickenschermodus mit einer Resonanzfrequenz von etwa 5 MHz betrieben

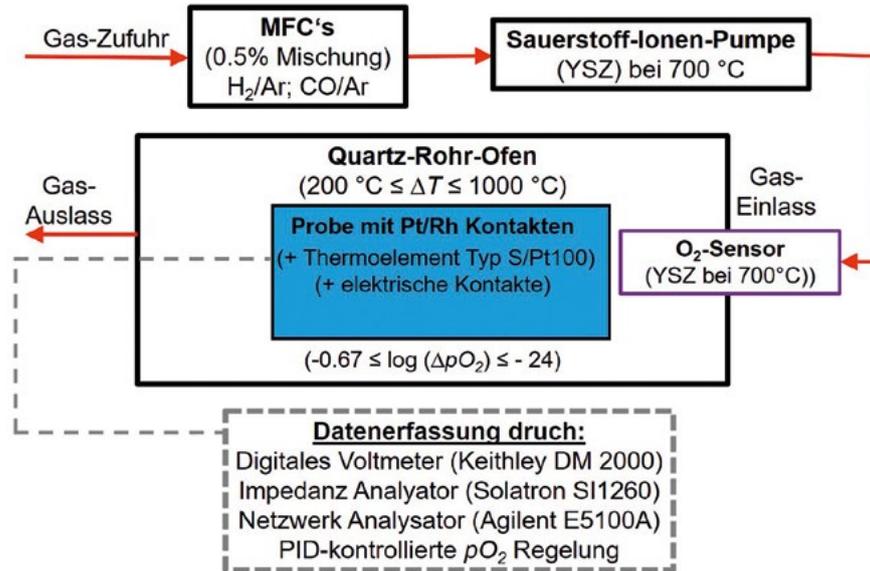


Abbildung 2: Skizze des Messaufbaus

und sind mit dem jeweiligen Sauerstoffspeicher-Material beschichtet. Die aus der Nichtstöchiometrie der Sauerstoffspeicher-Materialien resultierende Massenänderung verursacht eine entsprechende Frequenzverschiebung, welche in Abhängigkeit der Temperatur und des Sauerstoffpartialdrucks bestimmt wird. Die Massensensitivität der CTGS-Resonatoren liegt bei etwa 7 ng/Hz (bei Raumtemperatur) und die Temperaturstabilität reicht bis zur Schmelztemperatur ( $T_s$ ) von etwa 1.370°C, was die CTGS-Resonatoren als hochtemperaturstabile nanogravimetrische Sensoren auszeichnet.

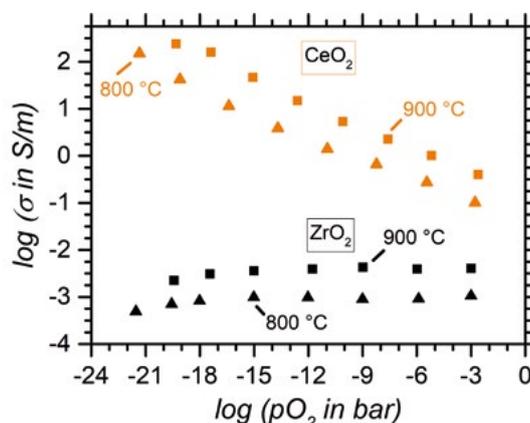


Abbildung 3: Leitfähigkeit aus Impedanz-Spektren für CeO<sub>2</sub> und ZrO<sub>2</sub> in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdrucks bei 800°C und 900°C

## Ergebnisse

Die Nichtstöchiometrie von Sauerstoffspeicher-Materialien, wie z.B. CeO<sub>2-x</sub> als auch für ausgewählte Zusammensetzungen von Cer-Zirkon-Mischoxiden, wird in Abhängigkeit des  $pO_2$  im Bereich von  $10^{-0.67}$  bar (Luft) bis  $10^{-21}$  bar bei ausgewählten Temperaturen im Bereich von 200°C bis 1.000°C untersucht (Abbildung 1). Durch die Verwendung von CTGS-Resonatoren (hochtemperaturstabiler nanogravimetrischer Sensor) können Massenaufösungen von 20 ng bis 40 ng im Hochtemperaturbereich erreicht werden. Vergleichend werden die Daten zur Nichtstöchiometrie für ausgewählte Zusammensetzungen von Cer-Zirkon-Mischoxiden bestimmt und diskutiert (Abbildung 2). Die so bestimmte Nichtstöchiometrie, in Abhängigkeit der Temperatur, des Sauerstoffpartialdrucks und der Zusammensetzung der jeweiligen Sauerstoffspeicher-Materialien, soll in Kombination mit Leitfähigkeitsuntersuchungen mithilfe der elektrochemischen Impedanz-Spektroskopie einen gesamtheitlichen Überblick über die Defektchemie dieser Materialien ergeben. Daraus sollen Rückschlüsse auf die Änderungen der dielektrischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Sauerstoffspeicher-Kapazität der in TWCs verwendeten Sauerstoffspeicher-Materialien gezogen werden. Diese Daten sollen dann als Basis für eine mikrowellen-basierte Katalysator-Zustandserkennung in der heutigen Abgasnachbehandlung (TWC) von Otto-Motoren dienen.

## Zugehörige Tagungsbeiträge

- [1] A. Wollbrink, C. Steiner, R. Moos, H. Fritze: Non-stoichiometry and electrical impedance of thin-film ceria-zirconia solid solutions at elevated temperatures, Materials Science and Engineering Congress (MSE), 26.–28.09.2018, Darmstadt, Germany, Poster F01.
- [2] A. Wollbrink, H. Fritze, C. Steiner, R. Moos: Investigation for direct sensing the state of three-way-catalysts in the exhaust gas aftertreatment, Sensoren und Messsysteme 2019, 25.06.–26.06.2019, Nürnberg, Vortrag 2.4.1.
- [3] A. Wollbrink, C. Steiner, R. Moos, H. Fritze: Nanogravimetrische Sensoren zur In-situ-Bestimmung der Nichtstöchiometrie von Sauerstoffspeicher-Materialien ( $Ce_{1-y}Zr_yO_{2-x}$ ), 14. Dresdner Sensor-Symposium (DSS), 02–04.12.2019, Dresden, Vortrag „Neue Sensormaterialien“.

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

In-Situ-Verfahren zur Bestimmung hoher Sauerstoffdefizite in Cer-Zirkon-Mischoxiden für den Einsatz in der Abgasnachbehandlung

### Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft

### Förderkennzeichen:

FR1301/23-1

### Laufzeit des Vorhabens:

16.03.2017–15.03.2020

### Berichtszeitraum:

16.03.2017–18.10.2019

### Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Clausthal

### Ausführende Stelle:

Forschungszentrum  
Energiespeichertechnologien

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

### Projektkoordinator:

Alexander Wollbrink, M.Sc.  
E-Mail:alexander.wollbrink@tu-clausthal.de

### Internet:

[www.iept.tu-clausthal.de/arbeitsgruppen/hochtemperatur-sensorik/](http://www.iept.tu-clausthal.de/arbeitsgruppen/hochtemperatur-sensorik/)



Holger Fritze

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

## Kurzfassung

Das Kraftwerk Huntorf ist als Speicherkraftwerk konzipiert worden, um Druckluft als Energiespeicher verwenden zu können. Die Idee war zum damaligen Zeitpunkt, Luft aus der Umgebung auf 60 bar in eine Salzkaverne zu komprimieren und somit zu speichern, wenn aus dem nahegelegenen Atomkraftwerk ein Stromüberschuss vorliegt. Wird in Zeiten von Strommangel wieder Energie benötigt, kann diese Luft über eine Turbine geleitet und damit wieder Strom generiert werden. Durch Zwischenschalten dieser Turbine wird bei der Entspannung technische Arbeit gewonnen, welche wiederum in elektrische Leistung umgewandelt werden kann. Die Luft muss aus physikalischen Gründen allerdings mit Erdgas vorgewärmt werden, bevor sie durch die Turbine geleitet werden kann. Durch den Beschluss der Regierung sollen Kraftwerke klimaneutral ausgelegt werden. Folglich ist das Ziel, dieses Erdgas durch Wasserstoff zu substituieren, um so klimaschädliche Abgase zu vermeiden. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt dieses Projektes ist die Entwicklung eines thermodynamischen

Models und die Untersuchung des Kraftwerkes Huntorf im sich wandelnden Energiesystem.

## Abstract

The power plant Huntorf was designed as a storage power plant to use compressed air as energy storage. To that time, the idea was to compress air from the environment to 60 bar into a salt cavern, if there was a surplus of electricity from the nearby nuclear power plant. If energy is required again in times of electricity shortage, this air is directed through a turbine and thus electricity is generated. This turbine gains technical work, which in turn can be converted into electrical power. However, for physical reasons, the air must be preheated with natural gas before it can be routed through the turbine. The government's decision is to design power plants to be climate neutral. Consequently, the goal of this resolution natural gas is to be replaced by hydrogen, to avoid harmful exhaust gases. Another research focus of this project is the development of a thermodynamic model and the investigation of the power plant Huntorf in the changing energy system.

## Projektpartner

- Uniper Kraftwerke GmbH
- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST), vertreten durch die Institute:
  - Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik (IEVB)
  - Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE)

## Projekthintergrund

Die Energiewende fördert den Bau von Kraftwerken für erneuerbare Energien und setzt sich für die Stilllegung von Kernkraftwerken und Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen ein. Die Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie, den zwei am schnellsten wachsenden erneuerbaren Energiequellen, variiert stark mit der Zeit, was zu schnellen Schwankungen der erzeugten Elektrizität führt. Dies wiederum erfordert flexible Energiespeichersysteme [1]. Der Druckluftspeicher (CAES) ist eine von vielen Möglichkeiten zur Speicherung von Stromüberschüssen und zur Lastverschiebung, wenn Strom zu Schwachlastzeiten benötigt wird. Das

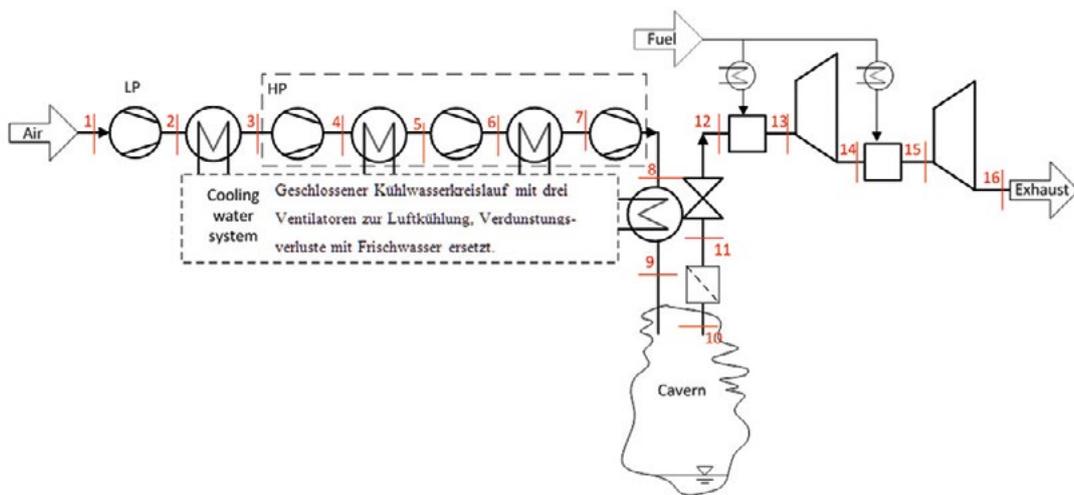


Abbildung 1: Prozessfließ - Diagramm von Huntorf CAES, unterteilt in 'Aufladen' und 'Entladen' (C - Kompressor; IC - Zwischenkühler; T - Turbine; B - Verbrenner) [1, 2]

Kraftwerk Huntorf galt lange Zeit als tragfähige Option zur Speicherung eines solchen Stromüberschusses. Da dieses Kraftwerk den Einsatz von Erdgas voraussetzt, erfüllt es nun nicht den geforderten Anforderungen der Energiewende. Durch die Verbrennung gelangen nach wie vor klimaschädliche Gase wie Kohlenstoffdioxid, Formaldehyd und Stickoxide in die Umgebung. Um diese Schadgase zu reduzieren, soll das Erdgas durch sogenannten „grünem“ Wasserstoff ersetzt werden. Hierzu soll zu Spitzenlastzeiten Strom aus Windkraftträdern, welche in ausreichender Zahl in unmittelbarer Umgebung stehen, dazu genutzt werden, Wasserstoff mittels Elektrolyse zu erzeugen. Dieser nun erzeugte regenerative Brennstoff soll in einer Salzkaverne zwischengelagert werden. Bei Schwachlastzeiten kommt dieser im Kraftwerk Huntorf anstelle des Erdgases zum Einsatz. Eine genaue Prozessbeschreibung wird im Folgenden erläutert.

Das Kraftwerk Huntorf ist ein Speicherkraftwerk, welches in Zeiten von Stromüberschuss Luft aus der Umgebung in eine Salzkaverne auf einen Druck von 60 bar komprimiert. In Zeiten von Strommangel wird diese Luft wieder entspannt. Durch Zwischenschalten einer Turbine wird bei dieser Entspannung technische Arbeit gewonnen, welche wiederum in elektrische Leistung umgewandelt werden kann. In einer Hochdruckbrennkammer wird die Luft bei 40 bar, mit Erdgas auf 500°C erhitzt. Anschließend wird die Luft in der Turbine entspannt. Durch

einen Beschluss der Regierung sollen Kraftwerke klimaneutral ausgelegt werden. Folglich ist ein Ziel dieses Projekts, das Erdgas durch Wasserstoff zu substituieren, um so klimaschädliche Abgase zu vermeiden. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt dieses Projektes ist die Entwicklung eines thermodynamischen Modells und die Untersuchung des Kraftwerkes Huntorf im sich wandelnden Energiesystem.

Das Kraftwerk Huntorf ist als Luftdruckspeicherkraftwerk konzeptioniert worden und nahezu einzigartig auf der Welt. Es wurde im Jahre 1978 in Betrieb genommen und war damals das erste kommerziell genutzte Druckluftspeicherkraftwerk der Welt. Seine ursprüngliche Aufgabe war, im Falle eines kompletten Netzausfalles eben dieses Netz wiederherzustellen, da ein solches Kraftwerk schwarzstartfähig ist. Zudem liegt die Aufgabe in Spitzenlastzeiten darin, Luft in die Kaverne zu pumpen und zu Schwachlastzeiten elektrischen Strom zu generieren. Insgesamt hat dieses Kraftwerk heute eine elektrische Leistung von 321 MW.

In Abbildung 1 ist das Prozessfließ - Diagramm des Kraftwerkes Huntorf zu sehen. Zudem wird dieser Prozess in einem h-s Diagramm gezeigt, welches in Abbildung 2 zu sehen ist. Über insgesamt vier Luftkompressoren wird im Kompressorbetrieb Umgebungsluft in eine Salzkaverne gepresst. In der ersten Verdichtungsstufe (1 bis 2) wird die Luft auf einen Druck von 6

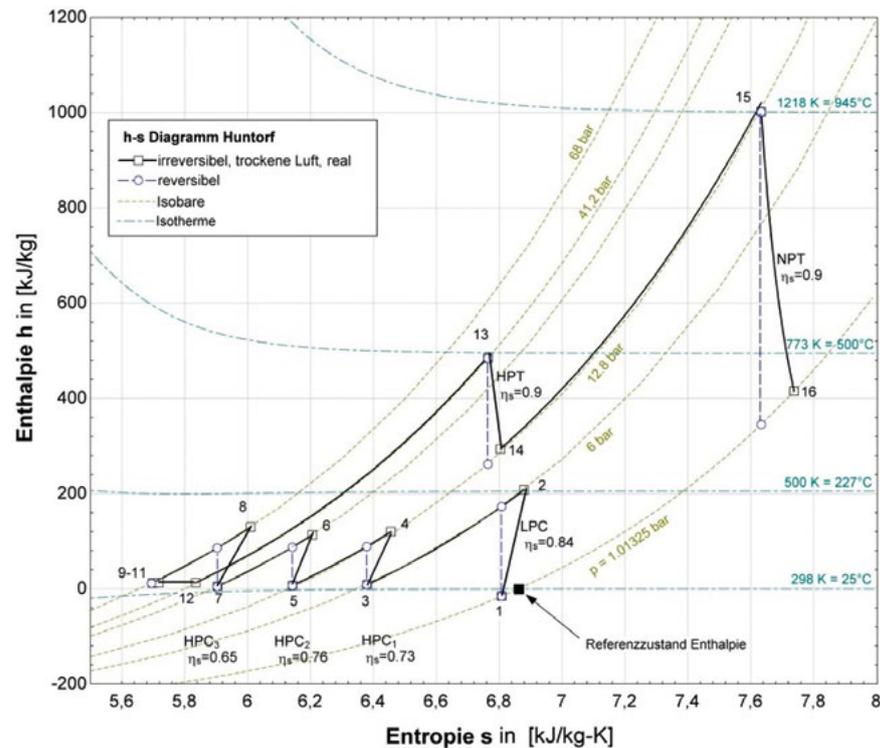


Abbildung 2: h-s Diagramm des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf [2]

bar gebracht, in einer zweiten Stufe (3 bis 4) auf 14 bar, in einer dritten Stufe (5 bis 6) auf 28 bar. Anschließend wird in der letzten Stufe (7 bis 8) diese Luft weiter auf 60 bar verdichtet und in einer Salzkaverne gespeichert. Eine isobare Kühlung zwischen den Stufen erfolgt von außen mit Wasser.

Wird nun Strom benötigt, kann die gespeicherte Luft im Turbinenbetrieb aus der Kaverne über Rohrleitungen einer Hochdruckbrennkammer (10 bis 13) zugeführt werden. Würde diese Luft nun nicht vorgewärmt werden, würden die Turbinen, durch den Feuchtegehalt der Luft, vereisen. Somit muss mit einem Brennstoff die Luft vor dem Eintritt in die Hochdruckturbinen vorgewärmt werden. Aufgrund der thermischen Belastung der Schaufel der Hochdruckturbinen können als Eintrittstemperatur nur Temperaturen von ungefähr 500 °C realisiert werden. Der Gasstrom (13) verlässt die Hochdruckturbinen (14) mit einem Druck von 13 bar und einer Temperatur von 310 °C. Der Sauerstoffanteil im Abgas beträgt 19 Prozent. Zur Erhöhung des technischen Wirkungsgrades wird diese Luft in eine weitere Brennkammer (nachfolgend als Niederdruckbrennkammer bezeichnet) geleitet. Hier erfolgt eine weitere Brennstoffzufuhr von 8 kg/s Erdgas, um die Luft auf 950 °C vorzuwärmen. Die Abgase der Niederdruckbrennkammer (15) strömen dann durch eine Niederdruckturbinen und verlassen diese bei Umgebungsdruck (16)

und einer Temperatur von ungefähr 430 °C. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird dieser gesamte Prozess als thermodynamisches Modell entwickelt, um auch auf die Wirkungsgrade dieser Anlage tiefer einzugehen. In [3] wird die Exergy dieser Anlage beschrieben. In [4] wird auf die Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf eingegangen.

Zur Untersuchung der Schadgase und der Charakterisierung der Flamme wird zunächst die gesamte Hochdruckbrennkammer in einem CFD-Programm simuliert und analysiert. Hierzu wird mit einem CAD-Programm die genaue Geometrie der Hochdruckbrennkammer abgebildet. Die sechs Meter hohe und einen Meter breite Brennkammer hat im Inneren eine komplexe Geometrie: Die aus der Kaverne austretende Luft wird über einen Zwischenraum zwischen Außenmantel und Innenseite der Brennkammer nach oben geleitet. Im oberen Kopf der Brennkammer wird die Luft zusammen mit dem Brennstoff vermischt und verbrannt. Zusätzlich wird die Luft an mehrere Stellen innerhalb des Brennraumes geleitet. In dem Brennraum selbst wird unter der Befehung mit dem Brennstoff eine sehr hohe Luftzahl erreicht ( $\lambda \approx 5$ ). Da die gesamte 3D-Geometrie mit einem Meshing Tool eine hohe Anzahl von Elementen hervorbringen wird, muss die Hochdruckbrennkammer aufgeteilt werden. In

einem ersten Vorgehen wird daher nur die kalte Strömungsführung in einem CFD-Programm simuliert. Dadurch kann auf die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in die eigentliche Brennkammer im Inneren geschlossen werden. In einem zweiten Schritt kann der wesentlich einfachere Brennraum simuliert werden. Bei dieser Simulation wird in Schritten von 10 Prozent (Vol.) kontinuierlich der Anteil von Wasserstoff bis auf 100 Prozent erhöht. Wichtig ist hierbei, dass die thermische Leistung des Brennstoffes nicht verändert wird. Aus diesem Grund wird, bei gleicher Luftmenge, der Massenstrom des Brennstoffes mit zunehmendem Wasserstoffanteil verringert. Die Simulation erfolgt mit dem  $k\text{-}3$  – Modell und dem EDC-Verbrennungsmodell. Als Reaktionsmechanismus wird ein vereinfachter Skeletal-Mechanismus verwendet. Um anschließend verlässliche Ergebnisse zu  $\text{NO}_x$ -Werten zu generieren, wird in einem Post-processing der Skeletal-Mechanismus durch den GRI3.0-Mechanismus ersetzt.

Die Ergebnisse zeigen eine generelle Machbarkeit zum Einsatz von Wasserstoff in der Hochdruckbrennkammer im Kraftwerk Huntorf. Bezüglich der Flammenstabilität und der Schademissionen ergibt sich den Verbrennungssimulationen zufolge eine Machbarkeit zum Einsatz von Wasserstoff in der Hochdruckbrennkammer bis zu einem Anteil von 40 Vol.-Prozent Wasserstoff im Brennstoff. Durch die verminderte Brennstoffzufuhr und die damit einhergehende gleichbleibenden Abgastemperatur wird bei jeder Simulation noch immer eine stabile Flamme erhalten. Auch die Wände der Hochdruckbrennkammer sind von etwaigen Schäden nicht betroffen, da durch die baubedingte Konstruktion der Brennkammer diese ausreichend durch die einströmende Luft gekühlt werden. Lediglich der verminderte Abstand vom Brennkopf mit einer Wasserstoffflamme könnte zu einem limitieren Einsatz von diesem Brennstoff führen, da durch die erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit von Wasserstoff mit dem Oxidationsmittel Sauerstoff der Abstand zwischen Flamme und Brennerkopf geringer wird und dieser somit einen thermischen Schaden erleiden könnte, da sich die Wärmestromdichte am Brennerkopf erhöht. Auch zeigen die Verbrennungssimulationen eine erhöhte Geschwindigkeit des Brennstoffes aus den Löchern der Brennstoffzufuhr mit einer zunehmenden Konzentration von Wasserstoff im Brennstoff. Die baubedingte Konstruktion des Brenners könnte aus diesem Grund zu einem mechanischen Bruch in den Brennstofflöchern führen. Dies erfordert noch weitere Untersu-

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Huntorf 2020 – Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff

### Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

### Förderkennzeichen:

03ET6139A

### Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2018 – 31.12.2020

### Berichtszeitraum:

01.01.2018 – 01.12.2019

### Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Clausthal

### Ausführende Stelle:

Forschungszentrum  
Energiespeichertechnologien

### Projektleiter:

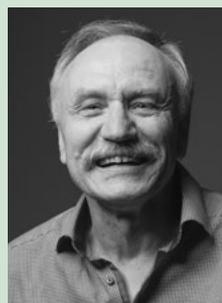
Prof. Dr.-Ing. Roman Weber  
E-Mail: [info@ievb.tu-clausthal.de](mailto:info@ievb.tu-clausthal.de)

### Teilprojektleiter:

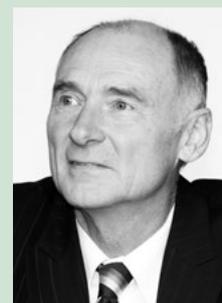
Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Internet:

[www.huntorf2020.de](http://www.huntorf2020.de)



Roman Weber



Hans-Peter Beck

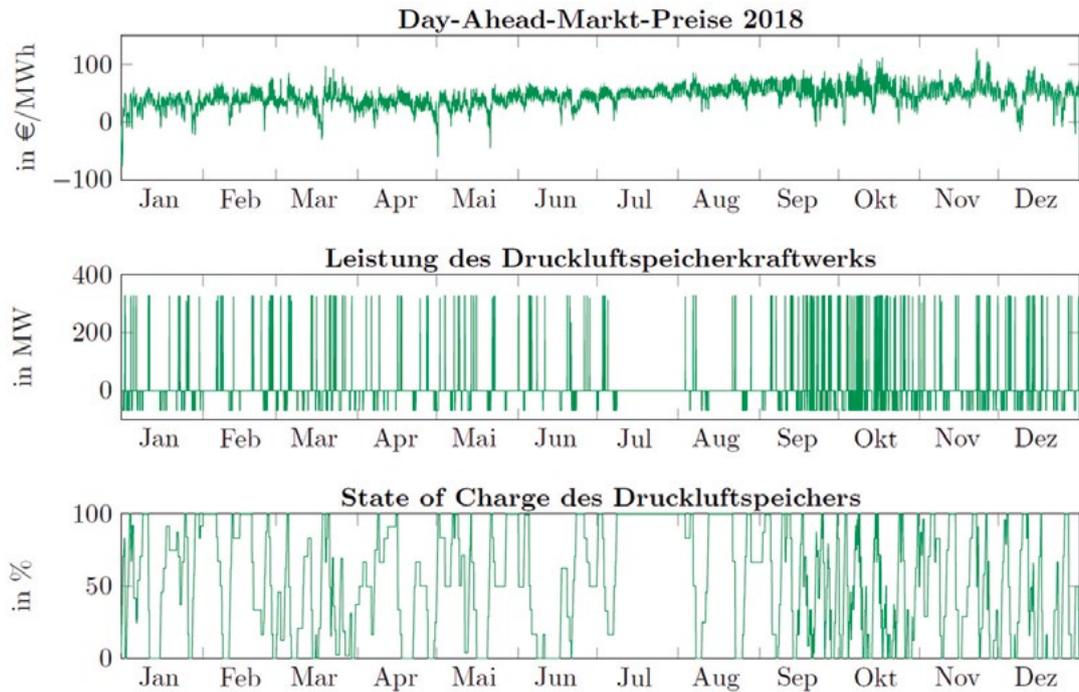


Abbildung 3: Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf durch Gewinnmaximierung mit den Day-Ahead-Markt-Preisen des Jahres 2018

chungen. Aus diesem Grund sind Experimente mit höheren Wasserstoffanteilen (ab 40 Vol.-Prozent im Brennstoff) in einem skalierten Brenner notwendig, ähnlich dem verbauten Hochdruckbrenner im Kraftwerk Huntorf, um einen Einsatz von reinem Wasserstoff in diesem Kraftwerk zu untersuchen.

In den vergangenen Jahren wurde das Kraftwerk größtenteils dazu genutzt, Minutenreserve bereitzustellen. Dabei wurden aber nur wenige Volllaststunden pro Jahr realisiert [5]. Innerhalb des Projekts wird deshalb mithilfe einer gemischt-ganzzahligen linearen Einsatzoptimierung (MILP) untersucht, ob das Kraftwerk Huntorf am Day-Ahead-Markt Gewinn erzielen kann. Dafür wird das Verhalten des Kraftwerks mithilfe linearer Gleichungen abgebildet. Die Zielfunktion der Optimierung stellt die Gewinnmaximierung beim Einsatz am Day-Ahead-Markt dar. Die Steuern und Abgaben beim Einkauf von elektrischer Energie, die Kosten pro Start sowie die Kosten für Erdgas werden berücksichtigt. In Abbildung 1 ist der optimierte Einsatz des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf anhand des Börsenstrompreises im Jahr 2018 dargestellt.

Die erste Variante des Optimierungsmodells beinhaltet eine perfekte Prognose. Das heißt,

dass historische Daten des Börsenstrompreises verwendet werden, um den Einsatz des Kraftwerks innerhalb eines gesamten Jahres zu optimieren. Es wird davon ausgegangen, dass der Börsenstrompreis des gesamten Jahres bekannt ist. In der Realität kann der Börsenstrompreis lediglich einige Tage im Voraus vorausgesagt werden, wobei auch hier eine Restunsicherheit vorhanden ist. Deswegen wird eine zweite Variante des Modells entwickelt, bei dem der Börsenstrompreis nur zwei bzw. fünf Tage im Voraus bekannt ist. Dabei wird der Einsatz für jeden Tag des Jahres einzeln optimiert.

Es werden die Börsenstrompreise der letzten vier Jahre ausgewertet (2015 bis 2018). Die Ergebnisse sind in Abbildung 2 dargestellt. Der Gewinn, den das Druckluftspeicherkraftwerk theoretisch pro Jahr am Day-Ahead-Markt erzielen kann, schwankt zwischen 670.000 € und 1.800.000 €, wenn man von einer perfekten Prognose ausgeht. Die Volllaststunden betragen zwischen 534 und 1672 Stunden pro Jahr. Wird die Prognose auf fünf Tage beschränkt, verringert sich der Gewinn um durchschnittlich 6 Prozent bei einer beschränkten Prognose von zwei Tagen um 20 Prozent.

Die Einsatzoptimierung des Kraftwerks Huntorf zeigt, dass die Volllaststunden beim Einsatz am

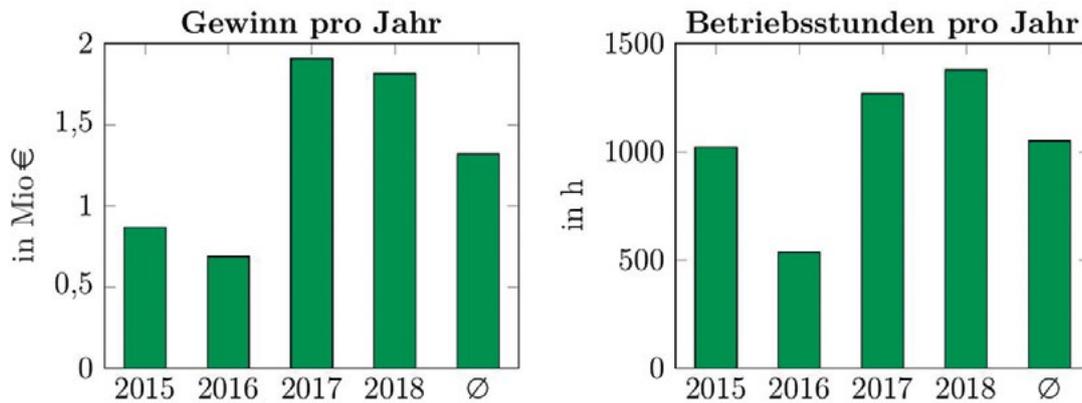


Abbildung 4: Gewinn pro Jahr (links) und Betriebsstunden pro Jahr (rechts) mit Einsatzoptimierung am Day-Ahead-Markt bei perfekter Prognose

Day-Ahead-Markt gegenüber dem bisherigen Einsatz am Minutenreservemarkt um das Drei- bis Achtfache steigen. Außerdem erzielt das Kraftwerk mit der Teilnahme am Day-Ahead-Markt einen nicht unerheblichen Gewinn. Mit dem MILP-Modell lassen auch andere Einsatzszenarien und andere Kraftwerksvarianten untersuchen. Dabei kann das Kraftwerksmodell um ein Elektrolyse-Modul erweitert werden, um die regenerative Erzeugung des benötigten Wasserstoffs ebenfalls zu optimieren. Andere Einsatzmöglichkeiten sind der Regelleistungsmarkt und die Glättung von erneuerbarer Erzeugung.

## Literatur

- [1] Scholz R., Beckmann M., Pieper C., Muster M., Weber R.: Considerations on providing the energy needs using exclusively renewable sources: Energiewende in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35, 109–125, 2014.
- [2] Kaiser F., Weber R., Krüger U.: Thermodynamic Steady-State Analysis and Comparison of Compressed Air Energy Storage (CAES) Concepts, *International Journal of Thermodynamics*, 21(3), 144–156, 2018.
- [3] Kaiser F., Krüger U.: Exergy Analysis and Assessment of Performance Criteria for Compressed Air Energy Storage (CAES) Concepts. *International Journal of Exergy (IJEX)*, Vol. 28 (No. 3), pp. 229–254, 2019.
- [4] Fries A., Wehrmann E.-A., Beck H.-P.: Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf am Day-Ahead-Markt, 51. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, 2019.
- [5] Crotagino, F.; Mohmeyer, K.-U.; Scharf, R.: Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. Orlando (USA), 2001.

# EWAZ: Energie- und Wasserspeicher Harz

## Entwicklung innovativer Ansätze zur Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen von Hochwasserschutz, Ressourcensicherung und Energiespeicherung

### Kurzfassung

Hintergrund des Projektes „Energie- und Wasserspeicher Harz“ sind die Auswirkungen des Klimawandels im Harz. Hierzu wird der Harz in verschiedenen Arbeitsschritten untersucht. Dabei werden meteorologische Klimaszenarien beleuchtet, Systemoptimierungen ermittelt und mögliche Verbesserungen im Kontext mit sozio- und ökonomischen Fragen bewertet.

Durch diese Daten wird analysiert, wie bereits vorhandenen Anlagen optimiert werden können. Durch den jahrhundertelangen Bergbau existieren im Harz eine Vielzahl von unterirdischen Stollen und Schächten, die zum Beispiel mit Talsperren verbunden werden können, um

Wasser noch besser zu verteilen. Neben der Verbesserung von bereits existierenden Anlagen thematisiert das Forschungsprojekt aber auch mögliche Neubauten und Erweiterungen von Talsperren.

### Abstract

The Background to the project “Energy and Water Storage in Harz” is the effects of the climate change in Harz region. For this purpose, the region will be analyzed through different steps. In the course of this project, different meteorological climate scenarios will be examined, system optimizations will be determined and possible improvements in the context of socio-economic questions will be evaluated.

Based on this data, the possibility of optimization in the existing systems will be analyzed. Through centuries of mining, there is a variety of underground tunnels and shafts in the Harz region, which can be connected to dams to have a better water distribution system. In addition to the improvement of the existing facilities, this research project also addresses possible new constructions and extensions of dams.

### Hintergrund

Mit der Schließung des letzten Bergwerks in Bad Grund im Jahr 1992 ging eine über 1000jährige Wirtschaftsgeschichte im Harz zu Ende. Die bergbauliche Infrastruktur (Zugänge, Stollen und Schächte) wurde im Zuge der Schließungen stillgelegt, ist heute aber noch weitgehend erhalten und dient v.a. musealen Zwecken. Im Zuge der Umsetzung der Energiewende bieten sich jedoch erhebliche Potenziale, das vorhandene bergbauliche Potential im Harz für neue Anwendungen wieder dauerhaft nutzbar zu machen.

Mit steigendem Anteil fluktuierender, regenerativer Einspeisungen in das Stromnetz leisten

### Projektpartner

- TU Clausthal (Verbundkoordinator)
  - Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck (Projektleitung), Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme
  - Prof. Dr. Roland Menges, Institut für Wirtschaftswissenschaft
  - Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld, Institut für Bergbau
- TU Braunschweig
  - Prof. Dr.-Ing. Günter Meon, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI), Abteilung Hydrologie, Wasserwirtschaft und Gewässerschutz
- Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
  - Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher, Fakultät für Bau-Wasser-Boden, Suderburg

### Kooperationspartner:

- Harz Energie GmbH & Co. KG
- Harzwasserwerke GmbH

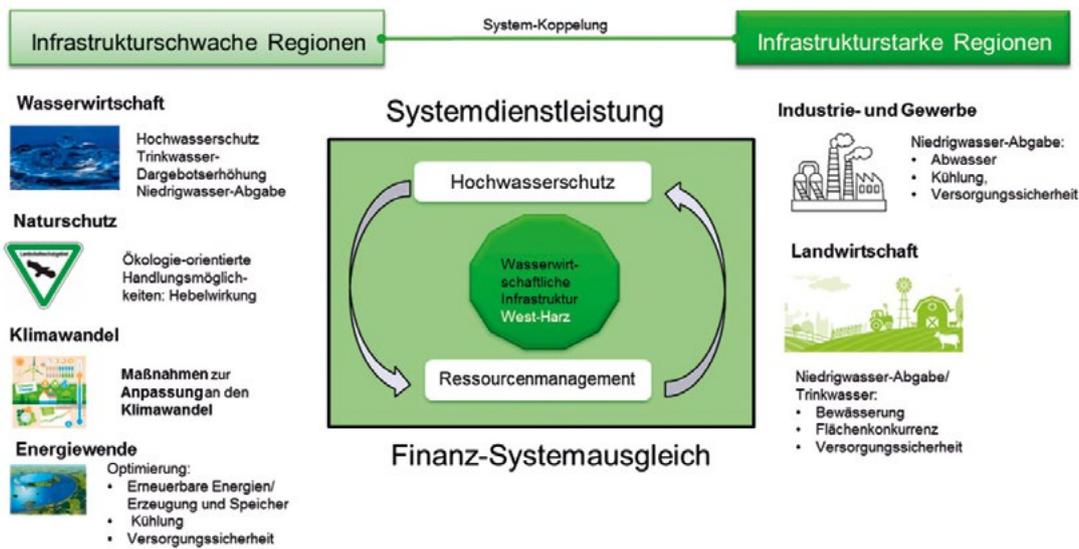


Abbildung 1: Systemdienstleistung der Harzregion zur Steigerung der Resilienz der wasserwirtschaftlichen Infrastruktur und Wasserkörper in weiten Teilen von Niedersachsen (Quelle: Harzwasserwerke GmbH)

Energiespeicher mit ihrem Ausgleich von Energiebereitstellung und -nutzung substantielle Beiträge für ein funktionsfähiges Energiesystem. Speicherkapazitäten in Norddeutschland sind insbesondere in Kombination mit der Windenergie, die ebenfalls zu großen Teilen in Norddeutschland in die Netze einspeist, von Bedeutung, um Leitungskapazitäten besser auszunutzen und (elektrische) Systemdienstleistungen wie beispielsweise Momentanreserve vor Ort bereitzustellen. Neue großtechnische Speicherpotenziale erscheinen jedoch v.a. aufgrund der erheblichen Eingriffe in die Natur und den damit verbundenen Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung, aber auch aufgrund der fehlenden Wirtschaftlichkeit unter den aktuellen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht realisierbar.

### Zielsetzung des Verbundprojektes

Unter den oben genannten Voraussetzungen ist das Ziel dieses interdisziplinären Vorhabens, mit der systemischen Kopplung der Energie- und Wasserwirtschaft eine wissenschaftliche fundierte Konzeption für einen „Energie- und Wasserspeicher Harz“ zu entwickeln, der die zukünftigen überregionalen Anforderungen in den Zieldimensionen Energieerzeugung und -speicherung, Hochwasserschutz, Trinkwassergewinnung sowie der Niedrigwasserabgabe erfüllt (vergleiche Abbildung 1). Hierzu

werden verschiedene Maßnahmen systemisch erfasst und anschließend unter Kosten-Nutzen-Aspekten (auch aus volkswirtschaftlicher Sicht) miteinander verglichen. Da der Harz hydrologisch als großes Wasserüberschussgebiet zu betrachten ist und Klimawandelprojektionen zukünftig eine Erhöhung des dortigen mittleren jährlichen Wasserdargebot erwarten lassen, erscheint ein solcher integrativer Ansatz zwingend geboten.

Zusammengefasst verfolgt das Forschungsvorhaben folgende Ziele:

- Nachnutzung bestehender (bergbaulicher) Infrastruktur zum Ausbau der regenerativen Stromerzeugung und -speicherung
- Zusammenstellung von wasserbaulichen Über- und Untertagemaßnahmen (Klimawandelanpassungsstrategien zum Hochwasserschutz) im Harz, die den Hochwasserschutz (inkl. Starkregenereignisse) im Harzgebiet selbst und im Harzvorland signifikant verbessern
- Entwicklung und Einsatz eines numerischen Modellsystems, mit dem der Wasserhaushalt und die Bewirtschaftung des Wasser- und Energiespeichers Harz mithilfe von Langzeitsimulationen nachgebildet (Vergangenheit bis heute) und prognostiziert (Zukunft) werden
- Bewertung dieser Maßnahmen mit Blick auf Sicherung und Ausbau der Trinkwasserressourcen im Harz

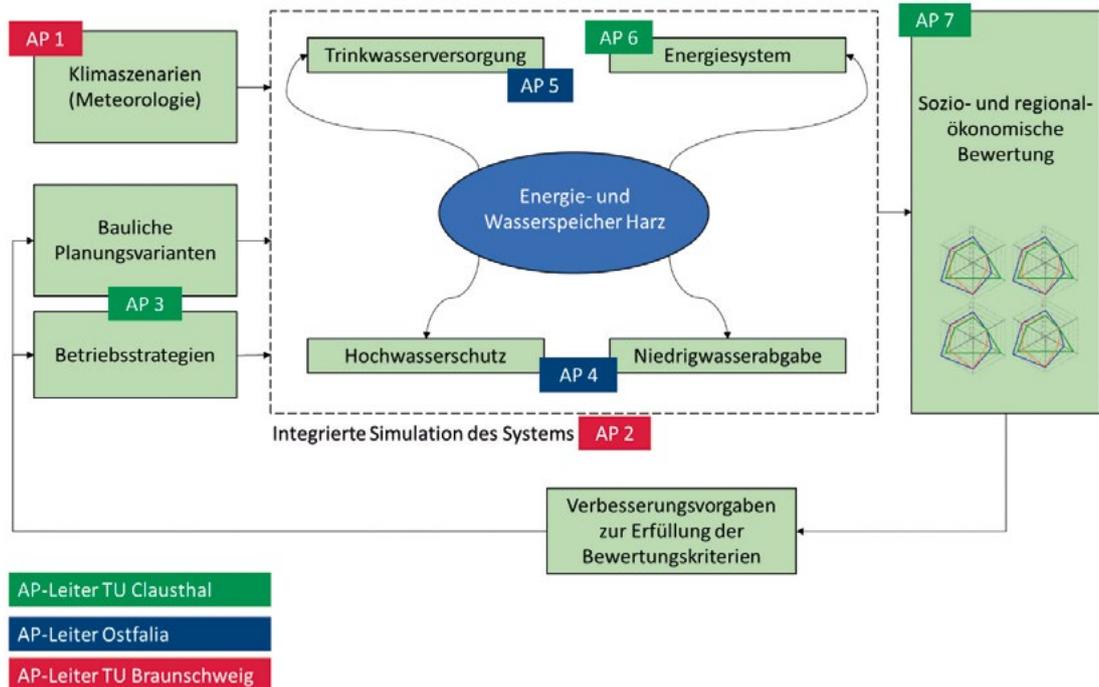


Abbildung 2: Gesamtkonzept des Verbundprojektes

- Bereitstellung von Speicherreserven für Trockenzeiten in Verbindung mit Pumpspeicherwerken, um die Mindestwasserführung der Fließgewässer unterhalb der Speicher zu sichern
- Priorisierung von Maßnahmen, die unter Kosten-Nutzen-Gesichtspunkten für die Gesellschaft und die Region Harz systemisch den größten langfristigen Nutzen entwickeln.

## Methodik

Im Fokus ist das System Energie- und Wasserspeicher Harz mit den gekoppelten Systemdienstleistungen

- nachhaltige Stabilisierung des Energiesystems (Energieerzeugung und -speicherung),
- Hochwasserschutz,
- Niedrigwasserabgabe sowie
- Trinkwassergewinnung.



Abbildung 3: Projektteam zusammen mit der Staatssekretärin Dr. Johannsen aus dem MWK und dem Präsidenten der TU Clausthal, Prof. Schachtner, Foto: C. Ernst

Alle vier Teilsysteme sind gekoppelt und beeinflussen sich dadurch gegenseitig (siehe Abbildung 2). Die individuellen Beiträge der einzelnen Aufgaben zum übergeordneten Ziel einer integrativen und nachhaltigen Systemdienstleistung für Niedersachsen mit volkswirtschaftlichem Mehrwert werden zunächst erfasst und quantifiziert.

Um den zu erwartenden Nutzen dieser Dienstleistungen zu quantifizieren, werden Planungsvarianten für ein zukünftiges Wasserspeicher- und Bewirtschaftungssystem definiert. Planungsvarianten werden definiert als Neubau von Stauanlagen, Erweiterung vorhandener Stauanlagen, Nutzung offener Tagebauten sowie Nutzung von Untertage-Bauwerken bzw. Neuauffahrungen. Mittels mathematischer Modellrechnungen des Gesamtsystems über lange Zeitperioden werden die Wirkungen der Varianten gegenüber dem heutigen Zustand anhand von Bewertungskriterien quantifiziert.

Zur sozio- und regionalökonomischen Bewertung wird das definierte System mit unterschiedlichen Betriebsstrategien mathematisch modelliert und simuliert. Die dafür erforderlichen Bewertungskriterien werden erstmals für ein derartig gekoppeltes System entwickelt und exemplarisch angewendet.

Auf Basis der Ergebnisse werden Verbesserungsoptionen zur Erfüllung der Bewertungskriterien durch angepasste Betriebsstrategien und – wenn nötig – auch durch Änderungen der Planungsvarianten entwickelt. Diese Iterationsschleife wird jeweils unter den gegebenen Randbedingungen aus den meteorologischen Klimaszenarien durchlaufen.

Zur Analyse der zukünftigen Anforderungen zur Bereitstellung der Systemdienstleistungen zur lokalen Energieerzeugung und -speicherung, zum Hochwasserschutz, zur Trinkwassergewinnung sowie zur Niedrigwasserabgabe und der anschließenden konkreten Auswahl von Maßnahmen, die in der betrachteten Harzregion als sinnvoll identifiziert werden, gliedert sich das Projekt in folgende Arbeitsschritte:

- Bereitstellung von Abflusszeitreihen und wasserwirtschaftlichen Kennwerten
- Durchsicht und Bewertung der Pläne nicht realisierter Wasserbauvorhaben im Harz
- Berechnung von Speichervolumina mit einem digitalem Geländemodell
- Analysen zur Einbindung von bergbaulichen Anlagen (Tagebauten, unterirdische Bergstollen, OHWR)

## Daten zum Projekt

### Vorhabensbezeichnung:

Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ) - Entwicklung innovativer Ansätze zur Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen von Hochwasserschutz, Ressourcensicherung und Energiespeicherung

### Fördermittelgeber:

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), Förderlinie Innovationsverbünde, Spezialisierungsfeld Energiewirtschaft

### Förderkennzeichen:

ZW6-85037489 (TU Clausthal)

### Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2019 – 30.06.2022

### Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck

### Projektkoordinator:

Dr.-Ing. Jens zum Hingst  
(CUTEC Forschungszentrum)



Hans-Peter Beck



Jens zum Hingst

- Bestimmung der Speicherleistung von Einzelspeichern und Verbundsystemen
- hydraulische Berechnungen bei Maßnahmen zur Abflussregulierung (Wehranlagen, Gräben, Stollen)
- Ausweisung der Hochwasserschutzwirkung von Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen
- Berechnungen zur Trinkwassergewinnung und zur Sicherung der Rohwasserqualitäten im Harz
- Berechnungen zur Energieproduktion und -speicherung (Wasserkraftnutzung, Pumpspeicherbetrieb)
- sozioökonomische Bewertung der Maßnahmen

### Projektstand

Das Projekt wird im Rahmen der EFRE-Förderlinie Innovationsverbünde im Spezialisierungsfeld Energiewirtschaft seit dem 01.07.2019 gefördert und hat eine Laufzeit von drei Jahren. Am 28. August starteten die inhaltlichen Arbeiten mit einer Kick-Off-Veranstaltung, an der neben Vertretern der Projektpartner auch die Staatssekretärin Dr. Johannsen aus dem MWK und der Präsident der TU Clausthal, Prof. Schachtner teilnahmen (siehe Abbildung 3). Zum momentanen frühen Projektstand befinden sich die Partner in der Konzeptionsphase ihrer Arbeitspakete. Darüber hinaus erfolgt die Datenerhebung zur Erweiterung der Simulationsmodelle.

# FLEK: Femtosekundenlaserlegieren von Elektrokatalysatoren

## Kurzfassung

Da elektrische Energie aus regenerativen Quellen über den Tages- und Jahresverlauf stark fluktuiert und somit nicht zeitunabhängig im gewünschten Maße verfügbar ist, bedarf es adäquater Speicherlösungen. Als langfristiges Speichermedium mit hoher Energiedichte sind chemische Verbindungen wie Kohlenwasserstoffe oder molekularer Wasserstoff besonders gut geeignet. Dabei lässt sich Wasserstoff mithilfe der alkalischen Elektrolyse aus Wasser gewinnen und setzt als Nebenprodukt lediglich molekularen Sauerstoff frei. Neuartige Fertigungsverfahren können helfen, die limitierenden Faktoren des Elektrolysevorgangs zu minimieren und die elektrochemischen Prozesse an den Elektroden effizienter zu gestalten. Femtosekundenlaser-Materialbearbeitung stellt ein solches Verfahren dar. Es ermöglicht Festkörperoberflächen zu strukturieren sowie Fremdelemente aus festen, flüssigen und gasförmigen Quellen während des Prozesses einzuarbeiten und die intrinsische Aktivität des bearbeiteten Materials zu steigern. Zudem wird durch diese Oberflächenmodifikation das Ablöseverhalten der entstehenden Gasblasen verbessert, wodurch weitere störende Überspannungseffekte reduziert werden.

## Abstract

Since renewable power sources fluctuate over the course of the day and the year, the power supply is not available to a timely independent extent. Therefore, adequate storage solutions are required. Chemical compounds such as hydrocarbons or molecular hydrogen are suitable as a long-term storage media with a high energy density. Hydrogen can be obtained from water by means of alkaline electrolysis and only releases molecular oxygen as a by-product. Novel electrode manufacturing processes can help to minimize limiting factors of the electrolysis. Femtosecond laser material processing is such a process. It enables the structuring of solid surfaces and the simultaneous incorporation of foreign elements from solid, liquid and gaseous sources. Thereby the intrinsic activity of the processed material is increased. In addition,

this surface modification improves the gas bubble detachment during electrolysis. Consequently, losses are reduced and the performance is improved.

## Aktueller Projektstand

Bei Elektrolyseverfahren wie der alkalischen Wasserelektrolyse limitieren verschiedenste Verlustmechanismen den effizienten Umsatz. Ziel ist es, diese Verluste so weit wie möglich zu reduzieren. Dies kann durch eine Vergrößerung der Elektrodenoberfläche und Steigerung der intrinsischen Aktivität über die Einbringung von Katalysatormaterialien bewerkstelligt werden. Realisiert wird dies im Stand der Technik zurzeit durch Raney-Nickel-Elektroden. Deren Herstellung ist hinsichtlich der mechanischen Stabilität sowie deren Porosität noch mit Herausforderungen verbunden. Femtosekundenlaser-Materialbearbeitung bietet mehrere Vorteile. Durch den Laserprozess bilden sich mikro- und nanostrukturierte Bereiche auf den Oberflächen. Deren Größe, Form und Verteilung hängen von den justierbaren Laserparametern, dem verwendeten Prozessgas, von der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Art des Materials ab. In Abbildung 1 sind Oberflächenstrukturen verschiedener Materialien aufgeführt.

Die mechanische Stabilität bleibt nach der Bearbeitung weitestgehend erhalten. Strukturierte Oberflächenlegierungen sind unter anderem durch Bearbeitung von Elektroden erzielbar, auf die zuvor ein Fremdelement appliziert wurde. Dies konnte z.B. auf Nickel elektrochemisch abgeschiedenes Eisen erzielt werden. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt einer konischen Struktur nach der Abscheidung und Laserbear-

## Projektpartner

- Universität Stockholm
- Fraunhofer HHI
- TU Clausthal, Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT)

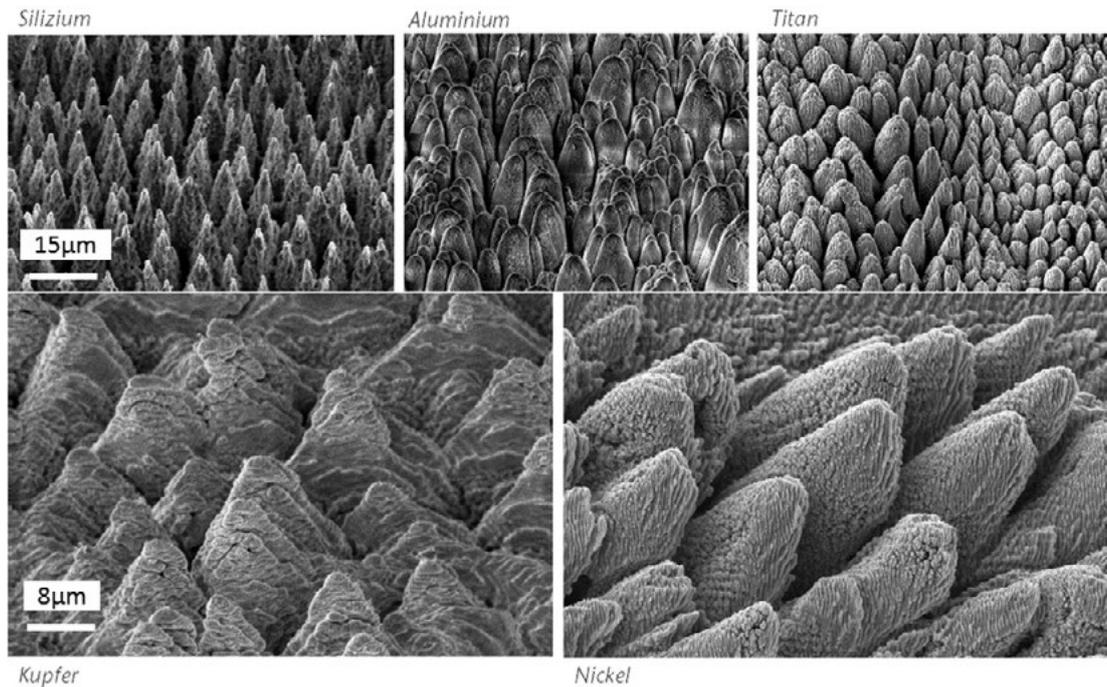


Abbildung 1: Elektronenmikroskopische Aufnahmen verschiedener laserstrukturierter Materialien

beitung mitsamt der farblich hervorgehobenen Verteilung von Nickel und Eisen.

Ebenso ist es möglich, Elektrodenoberflächen gezielt über den Laserprozess zu strukturieren und anschließend über Verfahren wie die Kathodenzerstäubung eine katalytisch aktive Schicht im nm-Bereich aufzubringen. Dies konnte an platinbeschichtetem Titan erfolgreich nachgewiesen werden. Beide Vorgänge haben bei Untersuchungen am Halbzellenmesstand gezeigt, dass die erwähnten Verluste reduziert und die Leistungsfähigkeit der alkalischen Elektrolyse verbessert werden konnte.

Neueste Erkenntnisse konnten im Rahmen des Projekts aufzeigen, dass die Femtosekunden-

laser-Materialbearbeitung nicht nur zur Bearbeitung von Festkörperoberflächen, sondern auch zur Erzeugung bi- und trinären Metallverbindungen mit gleichzeitig strukturierter Oberfläche verwendet werden kann. Die Fremdmittelquellen können dabei sowohl in wässrig gelöster, als auch fester Form vorliegen. Strukturierungsgrad der Oberfläche und Gehalt an einzubringendem Metall sind auch hier über die vorgelegte Menge des Metalls und die Laserparameter einstellbar. Dadurch erschließen sich neue Fertigungs- und Materialkonzepte, die eine Vielzahl von Kombinationen zulassen, die mittels konventioneller Verfahren nicht möglich sind. Weitere Untersuchungen hinsichtlich quantitativer und struktureller Einflüsse auf die alkalische Wasserelektrolyse sowie

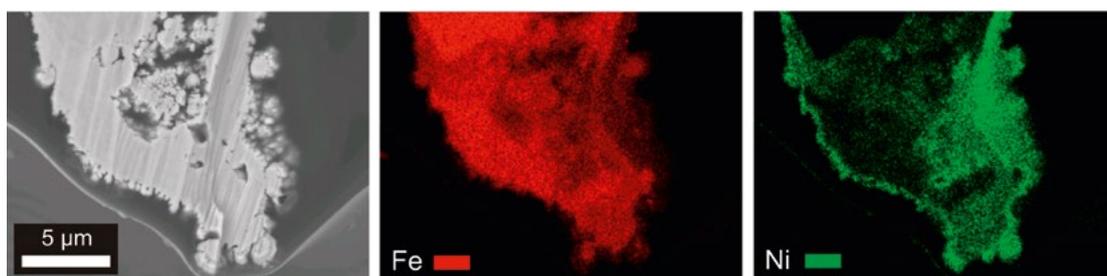


Abbildung 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Konus im Querschnitt nach Eisenabscheidung auf Nickel mitsamt Verteilung der Metalle erhalten mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (aus M. Koj, T. Gimpel, W. Schade, T. Turek, *Int. J. Hydrogen Energy* 44, 2019)

die Erforschung der gebildeten Oberflächenbeschaffenheit der Metallverbindungen folgen.

Über die alkalische Wasserelektrolyse hinaus gibt es im Rahmen des Projektes eine Kooperation mit der Abteilung Chemische Physik um Prof. Anders Nilsson an der Stockholm Universität in Stockholm, Schweden. Dabei wird mit Kupfer ein weiterer Elektrokatalysator adressiert, der zur elektrochemischen Reduktionsreaktion von CO<sub>2</sub> mit dem Femtosekundenlaser funktionalisiert wird. Aus der Kooperation sind ein wissenschaftlicher Gastaufenthalt in Schweden und eine bilaterale Masterarbeit der TU Clausthal hervorgegangen.

Das Projekt ist als Sachbeihilfe (Einzelprojekt) von der DFG finanziert. Neben der Kooperation mit dem schwedischen Partner wird es in Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer Heinrich-Hertz Institut (HHI) und dem Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT) bearbeitet. Die Entwicklung und Herstellung, sowie die Oberflächenanalyse der Elektroden erfolgt am EST und HHI, während am ICVT die Überprüfung der katalytischen Aktivität und Stabilität stattfindet.

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**

FLEK: Femtosekundenlaserlegieren von Elektrokatalysatoren

**Fördermittelgeber:**

Deutsche Forschungsgemeinschaft

**Förderkennzeichen:**

GI 1299/1-1

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.07.2018–30.06.2021

**Projektleiter:**

Dr. Thomas Gimpel

**Projektkoordinator:**

Viktor Hoffmann, M.Sc.



Thomas Gimpel



Viktor Hoffmann

# Nachhaltigkeitsbewertung von Power-to-Methan

## Kurzfassung

Das Ziel der Bundesregierung, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Basisjahr 1990 zu reduzieren, sowie der voranschreitende Klimawandel führen dazu, dass die Themen Energiewende und Nachhaltigkeit von besonderer Relevanz sind und zudem auf ein großes Interesse in der Bevölkerung treffen (Fridays-for-Future-Demonstrationen). Um die Ziele der Bundesregierung bis 2050 zu erreichen, erfolgt der Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) insbesondere in Form von Wind- und Solarenergieanlagen. Doch was passiert, wenn das Angebot aus Wind- und Solarenergie in der Zukunft die Nachfrage, vor allem in den Sommermonaten, übersteigt? Wohin mit dem Überschussstrom? Eine Möglichkeit besteht darin, den Überschussstrom in Power-to-Methan-Anlagen in synthetisches Erdgas umzuwandeln und anschließend ins Erdgasnetz einzuspeisen. In stofflicher Form

kann die Energie langfristig gespeichert und bei Bedarf wieder in elektrischen Strom oder Wärme umgewandelt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, das synthetisch hergestellte Erdgas in Kavernen zu speichern, um die Dunkelflaute im Dezember und Januar, wenn wenig Strom aus Wind- und Sonnenenergie zur Verfügung steht, abzufedern, weshalb dieser Technologie eine bedeutende Rolle in der Energiewende zugesprochen wird. Aufgrund des Klimawandels, der u.a. durch massiven Ressourcenverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß weiter voranschreitet, steht das Thema nachhaltige Energiewende im Fokus. Auch deshalb setzt sich dieses Projekt mit der Nachhaltigkeitsbewertung von Power-to-Methan-Anlagen auseinander. Dabei umfasst die Nachhaltigkeitsbewertung zum einen die Analyse von Umweltauswirkungen wesentlicher Komponenten und zum anderen die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Power-to-Methan-Anlagen aus Betreibersicht.

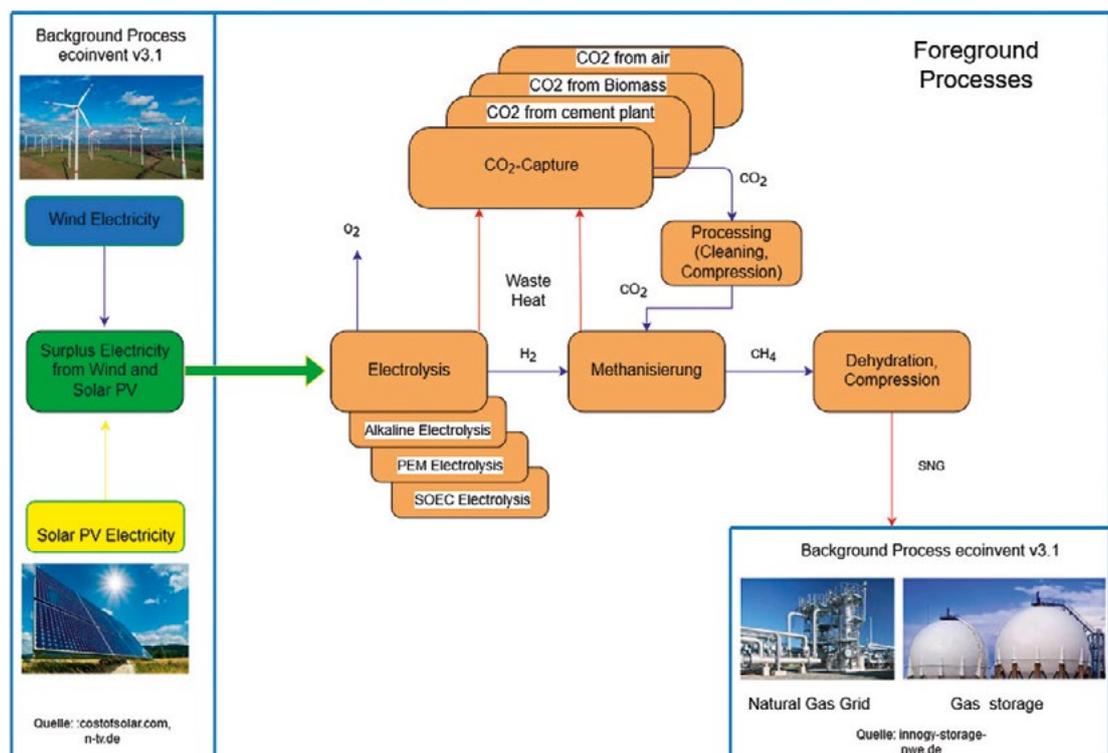


Abbildung 1: Systemgrenzen Power-to-Methan nach Zhang et al. 2017, Applied Energy S. 328

## Abstract

The Federal Government's target is to reduce CO<sub>2</sub> emissions by 85 % by 2050 in comparison to the base year 1990. At current, anthropogenic climate change is perceiving relevant public interest (Fridays-for-Future). To reach the Federal Government's target by 2050, an expansion of wind and solar energy plants is a substantial part of the German energy system transition. But what happens if the supply of wind and solar energy is higher than the demand? Where to go with the surplus energy? An opportunity is to produce synthetic natural gas (SNG) in power-to-methane plants and feed it into the natural gas grid as well as underground storage caverns. Thus, it is possible to convert the fed-in SNG into electric energy and heat when needed. Moreover, it is possible to compensate times of extremely low solar and wind power generation, typically in December and January. Therefore, the power-to-methane technology will play an important role in the future. Since climate change continues induced by extensive resource consumption and CO<sub>2</sub> emissions, substantial efforts are undertaken in order to realize the sustainable energy transition. Thus, this project deals with sustainability assessment of power-to-methane plants where environmental impacts of important components and costs from an operator's point of view need to be evaluated.

## Aktueller Projektstand

Ziel der Untersuchung ist die Nachhaltigkeitsbewertung wesentlicher Komponenten von Power-to-Methan-Anlagen, die im ersten Schritt unter Zuhilfenahme einschlägiger Literatur, durchgeführten Studien und Simulationssoftware (AspenTech) zu identifizieren sind. Dabei werden im Rahmen des Projekts verschiedene Arten der Wasserelektrolyse (alkalische, Membran- und Hochtemperatur-Wasserstoffelektrolyse) und CO<sub>2</sub>-Gewinnung (aus Biomasse, Zementherstellung und Luft) betrachtet. Anschließend erfolgt die Generierung der Daten für die Massenbilanz, welche die Basis der ganzheitlichen Modellierung bildet und alle wesentlichen Angaben zu den Rohstoffen der im ersten Schritt identifizierten Power-to-Methan-Komponenten enthält. Die Massenbilanz stellt die Grundlage für die Ökobilanz nach DIN ISO 14040/44 (Life-Cycle-Assessment, LCA) dar und beinhaltet dabei Daten für unterschiedliche Leistungsklassen von Power-to-Methan-Anlagen (von 1 MW bis 10 MW). Bevor die

## Daten zum Projekt

**Vorhabensbezeichnung:**  
Nachhaltigkeitsbewertung  
von Power-to-Methan

**Fördermittelgeber:**  
Eigenprojekt

**Laufzeit des Vorhabens:**  
01.05.2019–30.04.2022

**Projektleiterin:**  
Prof. Dr. Heike Schenk-Mathes

**Projektkoordinator:**  
Niklas Gerloff, M.Sc.



Heike Schenk-Mathes Niklas Gerloff

LCA-Analyse durchgeführt werden kann, sind die Systemgrenzen festzulegen (Abb. 1) und grundlegende Fragestellungen bzgl. der Allokation der CO<sub>2</sub>-Quellen und der Datenverfügbarkeit für Zukunftstechnologien zu bewerten.

Der zweite Projektabschnitt umfasst die Analyse der Wirtschaftlichkeit von Power-to-Methan-Anlagen aus Betreibersicht mit dem Ziel, spezifische Kosten (z.B. €/tCH<sub>4</sub>) zu entwickeln und einen möglichen Zusammenhang zwischen Kosten und Umweltdaten herzustellen. Dafür wird auf einschlägige Literatur zur Auslegung von chemischen Anlagen und Herstellerangaben zurückgegriffen.

Folgende Fragestellungen sind zu beantworten:

1. Was kostet eine Tonne synthetisch hergestelltes Methan im Vergleich zu natürlichem Methan?
2. Wie unterscheiden sich die Umweltauswirkungen von Power-to-Methan-Anlagen bezüglich der Art der Wasserelektrolyse und Wahl der CO<sub>2</sub>-Quelle?
3. Welche Kosten von Power-to-Methan-Anlagen entstehen in Abhängigkeit der gewählten Wasserstofftechnologie und CO<sub>2</sub>-Quelle?

Abschließend ist vorgesehen, ein Tool auf Basis der Massenbilanz zu entwickeln, das bei Eingabe der Leistungsklasse (z.B. 1 MW) die Kosten und Umweltauswirkungen entsprechend angibt.

## Zu Besuch im EST



*Besuch elenia - TU Braunschweig September 2019*



*Wirtschaftsdelegation der Stadt Jieyang April 2018*



*Besuch Gubkin Russian State Oil and Gas University Moscow März 2019*



*Elektroseminar des Staatlichen Baumanagements Südniedersachsen Oktober 2019*





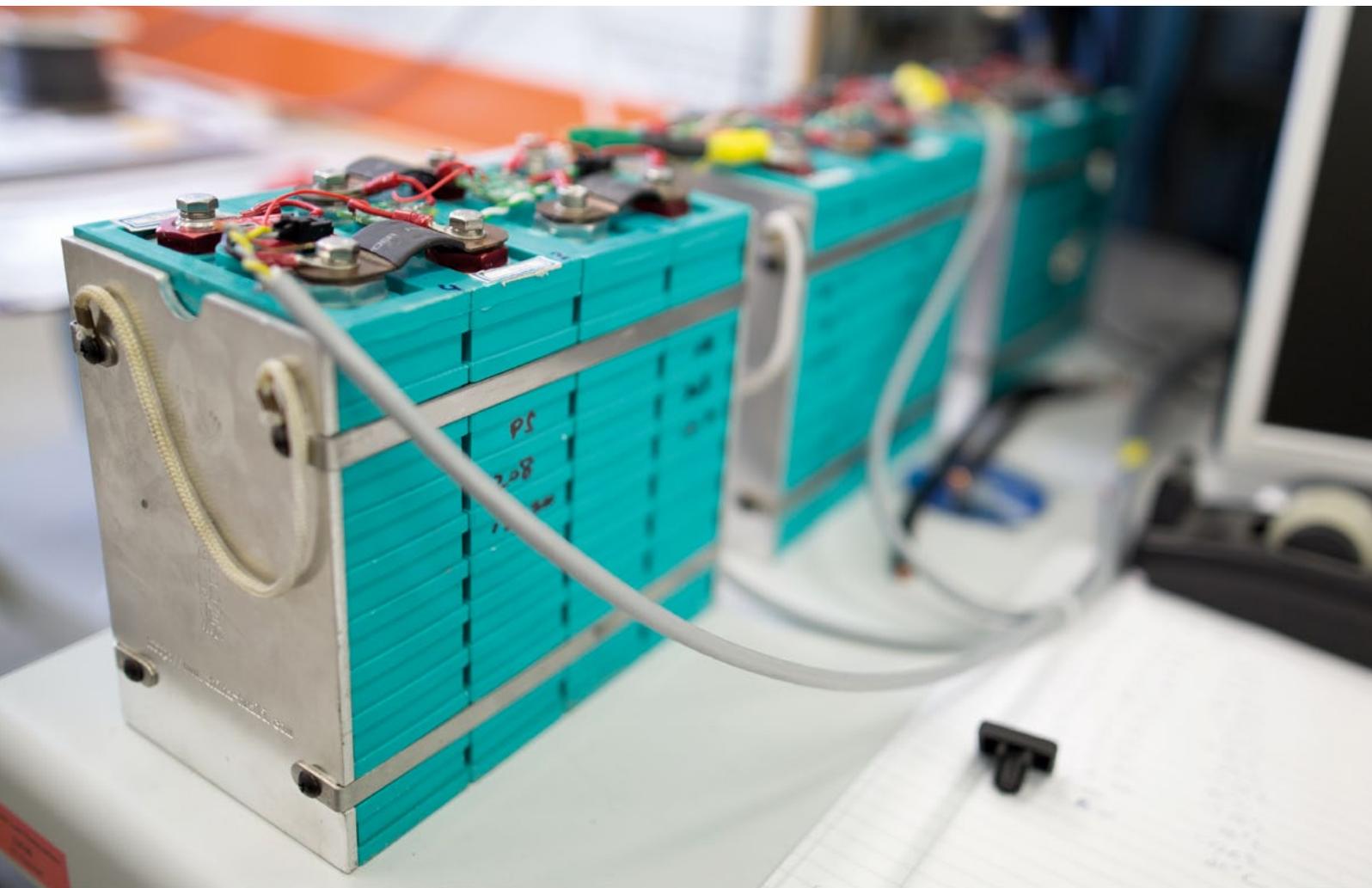
# WISSENSTRANSFER IN DIE PRAXIS

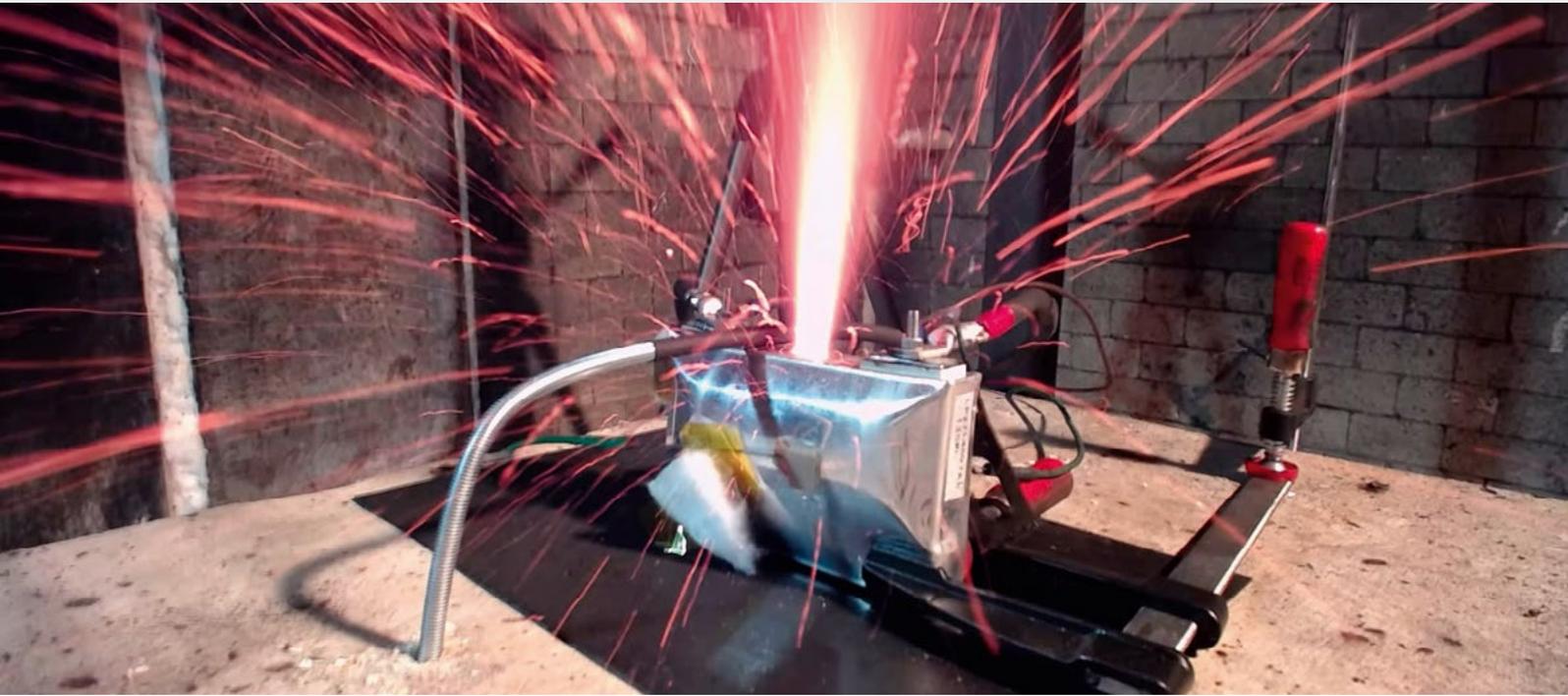
4.

## Batterie-Sicherheitscampus Deutschland – Wissenstransfer zwischen Forschung und Anwendung

Mit dem Ziel, den stetig wachsenden Herausforderungen an mobile und stationäre Energiespeicher im Hochleistungs-/Hochenergiebereich hinsichtlich Funktionalität, Zuverlässigkeit und Sicherheit auch unter extremen Einsatzbedingungen begegnen zu können, wurde im Jahr 2016 der „Batterie-Sicherheitscampus Deutschland (bsd)“ als Forschungs- und Transferplattform gegründet. Durch eine enge Kooperation zwischen Unternehmen und den auf dem EnergieCampus Goslar forschenden Einrichtungen sollen mittels gemeinsamer Forschungsprojekte in diesem Themengebiet u.a. neuartige Sicherheitskonzepte für Batterien entwickelt und verifiziert werden. Insbesondere stehen hier auch neue Anwendungsszenarien für im Verkehrsbereich nicht mehr verwendbare Energiespeicher in einem zweiten Lebenszyklus im Kern der Aktivitäten.

Neben den in den vergangenen Jahren vertieften bzw. mit neu beantragten und bewilligten Projekten ausgebauten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten stehen vor allem auch Maßnahmen der Informationsvermittlung und des Wissenstransfers im Fokus. Unter aktiver Mitwirkung der Wirtschaftsförderung Goslar (WiReGo) wurden verschiedene nationale Fachveranstaltungen strategisch genutzt, um die Kompetenzen des bsd vorzustellen und auf diese Weise neue Forschungspartner sowie industrielle Kunden zu gewinnen. Gerade über Kontaktaufnahmen im Rahmen der Messe „Energy Storage Europe“ konnten zahlreiche neue Kunden aus dem FuE-Bereich gewonnen und die nationale Sichtbarkeit deutlich erhöht werden. Besonders hervorzuheben ist hier der fachliche Austausch mit Trägern der gesetzlichen Unfallversicherung sowie der pri-





vaten Versicherungswirtschaft hinsichtlich der Beherrschbarkeit von Risiken leistungsstarker Batteriespeicher. Dieser mündete im Berichtszeitraum u.a. in die Beantragung eines gemeinsamen Verbundprojekts, dessen Start für Mitte 2020 geplant ist.

Auch in der überregionalen medialen Berichterstattung stieß das von der TU Clausthal gemeinsam mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI-FS) auf dem EnergieCampus Goslar bearbeitete Themenfeld Batteriesicherheit auf großes Interesse, wie beispielsweise die Anfragen und Berichterstattungen der ARD-Rundfunkanstalten rbb, NDR und SWR zeigten. Um den Erfahrungs- und Wissensaustausch auch im regionalen Kontext weiter auszubauen, wurde Ende 2019 eine stärkere Zusammenarbeit mit der Energie Ressourcen Agentur (ERA) Goslar und der WiReGo vereinbart: So werden sich EST und Fraunhofer HHI-FS ab dem Jahr 2020 in die Organisation und Durchführung der etablierten Veranstaltungsreihe „Unternehmergespräch ENERGIE“ einbringen, welche sich in den vergangenen mehr als 10 Jahren als bedeutende Informations- und Austauschplattform für wichtige Akteure der Region bewährt hat. Verfolgte die Reihe dem Namen nach das ursprüngliche Ziel, regionalen Unternehmen neueste Informationen zur ressourcenschonenden und wirtschaftlichen Energienutzung zu vermitteln, über Fördermöglichkeiten zu informieren sowie den Austausch untereinander zu stärken, soll mit dem weiterentwickelten Format auch weitere interessierte Öffentlichkeit in den fachlichen Austausch einbezogen werden.

## Daten zum Projekt

### Kooperationspartner:

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

### Koordination:

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





# ANHANG

5.

# Publikationen

2018

## Bücher

*Hou, Michael Z.; Li, MY.; Gou, Yang; Li, Mengting:* An improved creep constitutive model of rock salt

Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
2018 – ISBN 978-3-9814108-6-0

*Li, MY.; Hou, Michael Z.; Li, Mengting; Gou, Yang; Tao, S.:* Numerical study of a novel two-well horizontal gas storage cavern in thin-bedded rock salt in China

Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
2018 - ISBN 978-3-9814108-6-0

*Wang, G.; Hou, Michael Z.; Liao, Jiangxing; Liu, J.:* The experimental study of the short- and long-term strength of Chinese highly impure rock salt

Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
2018 – ISBN 978-3-9814108-6-0

*Hou, Michael Z.; Wang, G.; Feng, Wentao; Liu, J.; Mehmood, F.:* A density-based classification method for highly impure rock salt

Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
2018 - ISBN 978-3-9814108-6-0

*Hou, Michael Z.; Wang, G.; Liao, Jianxing; Sun, H.; Tao, S.:* The experimental study on the stress-, dilatancy- and impurity-dependent permeability behavior of impure rock salt in China

Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe  
2018 – ISBN 978-3-9814108-6-0

*Li, Mengting; Hou, Michael Z.; Zhou, Lei; Gou, Yang:* Numerical study of the hydraulic fracturing and energy production of a geothermal well in Northern Germany

London: Taylor & Francis  
2018 – ISBN 978-1-138-61645-5

*Feng, W.; Hou, Michael Z.; Liao, Jianxing; Were, Patrick:* Numerical study on the strategies to reduce the risk of induced seismicity in an Enhanced Geothermal System

London: Taylor & Francis  
2018 - ISBN 978-1-138-61645-5

*Gou, Yang; Feng, W.; Li, Mengting; Hou, Michael Z.:* Numerical Simulation of the Multistage Hydraulic Fracturing and Production in a Tight Gas Horizontal Well: History, Mat-

ching and Preliminary Optimization

London: Taylor & Francis

2018 – ISBN 978-1-138-61645-5

## Dissertationen

*Hagemann, Birger:* Numerical and Analytical Modeling of Gas Mixing and Bio-Reactive Transport during Underground Hydrogen Storage

Göttingen: Cuvillier Verlag

2018 – 978-3-7369-9714-1

(EFZN-Schriftenreihe; Bd. 50)

*van Cayzele, Sebastian:* Formulierung und Bewertung von szenariogestützten Geschäftsmodelloptionen: Energiewirtschaftliche illustrative Fallstudie

Göttingen: Cuvillier Verlag

2018 – 978-3-7369-9747-9

(EFZN-Schriftenreihe; Bd. 53)

## Beiträge in referierten Fachzeitschriften

*Mögelin, H.; Yao, G.; Zhong, H.; dos Santos, A.R.; Barascu, A.; Meyer, R.; Krenkel, S.; Wassersleben, S.; Hickmann, T.; Enke, D.; Turek, T.; Kunz, U.:* Porous glass membranes for vanadium redox-flow battery application: effect of pore size on the performance

Journal of Power Sources

(2018)

Vol. 377, S. 18–25

*Gimpel, Thomas; Wintwer, S.; Boßmeyer, M.; Schade, Wolfgang:* Quantum efficiency of femtosecond-laser sulfur hyperdoped silicon solar cells after different annealing regimes

Solar Energy Materials and Solar Cells

(2018)

Volume 180, S. 168–172

*Gerhard, Christoph; Gimpel, Thomas; Tasche, Daniel; Koch née Hoffmeister, Jennifer; Brückner, Stephan; Flaschenecker, Günter; Wieneke, Stephan; Schade, Wolfgang; Viöl, Wolfgang:* Atmospheric pressure plasma-assisted femtosecond laser engraving of aluminium

Journal of Physics D: Applied Physics –

Volume 51 (2018)

Nr. 17

*Gabler, Andreas; Müller, Christian I.; Rauscher, Thomas; Gimpel, Thomas; Hahn, Robert; Köhring, Michael; Kieback, Bernd; Röntzsch,*

- Lars; Schade, Wolfgang*: Ultrashort-pulse laser structured titanium surfaces with sputter-coated platinum catalyst as hydrogen evolution electrodes for alkaline water electrolysis  
International Journal of Hydrogen Energy  
Volume 43 (2018)  
Issue 15, S. 7216–7226
- Minke, Christine; Turek, Thomas*: Materials, system designs and modelling approaches in techno-economic assessment of all-vanadium redox flow batteries – A review  
Journal of Power Sources  
(2018)  
Volume 376, S. 66–81
- Kaiser, Friederike; Winde, Frank; Erasmus, Ewald*: Storing energy in disused underground mine voids: comparing pumped water- and compressed air-based technologies  
International Journal of Mining and Mineral Engineering  
Volume 9 (2018)  
No. 3, S. S. 177–197
- Kaiser, Friederike; Weber, Roman; Krüger, Uwe*: Thermodynamic Steady-State Analysis and Comparison of Compressed Air Energy Storage (CAES) Concepts  
International Journal of Thermodynamics  
Jg. 21 (2018)  
Nr. 3, S. 144–156
- Kaiser, Ferderike; Winde, Frank; Erasmus, Ewald*: Storing energy in disused mines: comparing pumped water- and compressed air-based technologies  
International Journal of Mining and Mineral Engineering  
Volume 9 (2018)  
Number 3, S. 177–197
- Hou, Michael Z.; Mehmood, Faisal*: Numerical Simulation of Innovative Fracking without Water or Chemical Additives  
European Geologist  
Volume 46 (2018)  
S. 17–23
- Wu, Nianhan; Zhao, Wu; Wang, Xin; Tao, Ye; Hou, Michael Z.*: A Novel Design of Through-Hole Depth On-Machine Optical Measuring Equipment for Automatic Drilling and Rive-ting  
Applied Sciences  
Volume 8 (2018)  
Issue 12, S. 2671
- Li, Yan; Ma, Yuyong; Tao, Ye; Hou, Michael Z.*: Innovative Methodology of On-Line Point Cloud Data Compression for Free-Form Surface Scanning Measurement  
Volume 8 (2018)  
Issue 12, S. 2556
- Li, Zhandong; Li, Chunxu; Li, Wei; Li, Li; Li, Yikun; Hou, Michael Z.*: Evolution and Characteristics of Sedimentary Systems during Fault-Depressed Trabsition in Songliao Basen: Case Study of the Dengloulou Formation in the Southwest Uplift Region  
India Journal of Geo Marine Sciences  
Volume 47 (2018)  
Issue 12, S. 2353–2368
- Gou, Yang; Hou, Michael Z.*: Rock Salt Creep Constitutive Model to Predict the Long-term Stationary Creep Rate with Short-term Laboratory Experimental Data (Chinesisch)  
Advanced Engineering Sciences  
Volume 50 (2018)  
Issue 5, S. 138–144
- Titscher, Paul; Riede, Jens-Christian; Wiedemann, Janosch; Kunz, Ulrich; Kwade, Arno*: Multiscale Structured Particle-Based Zinc Anodes in Non-Stirred Alkaline Systems for Zinc–Air Batteries  
Energy Technology: Generation, Conversion, Storage, Distribution  
Volume 6 (2018)  
Issue 4, S. 773–780
- Riede, Jens-Christian; Turek, Thomas; Kunz, Ulrich*: Critical zinc ion concentration on the electrode surface determines dendritic zinc growth during charging a zinc air battery  
Electrochimica Acta – Volume 269 (2018)  
S. 217–224
- Schafner, Katharina; Becker, Maik; Turek, Thomas*: Capacity balancing for vanadium redox flow batteries through electrolyte overflow  
Journal of Applied Electrochemistry  
Volume 48 (2018)  
Issue 6, S. 639–649
- Mögelin, Horst; Barascu, A.; Krenkel, S.; Enke, D.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas*: Effect of the pore size and surface modification of porous glass membranes on vanadium redox-flow battery performance  
Journal of Applied Electrochemistry  
Volume 48 (2018)  
Issue 6, S. 651–662
- Trinke, P.; Haug, P.; Brauns, J.; Bensmann, B.; Hanke-Rauschenbach, R.; Turek, Thomas*: Hydrogen crossover in PEM and alkaline water electrolysis: Mechanisms, direct comparison and mitigation strategies  
Journal of the Electrochemical Society  
Volume 165 (2018)  
Issue 7, S. F502–F513
- Bockelmann, Marina; Becker, Maik; Reining, Laurens; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas*: Passivation of Zinc Anodes in Alkaline Electrolyte: Part I. Determination of the Starting Point of Passive Film Formation

Journal of the Electrochemical Society  
Volume 165 (2018)

Issue 14, S. A3048–A3055

*Ke, X.; Drache, M.; Gohs, U.; Kunz, Ulrich; Beuermann, S.:* Preparation of polymer electrolyte membranes via radiation induced graft copolymerization on ETFE using the cross-linker N, N'-methylenebis(acrylamide)

Membrans

Vol. 8 (2018)

Issue 4, S. 102

*Weyer, Hartmut:* Das Zielmodell Messwesen der Bundesnetzagentur - Messung und Bilanzierung von Letztverbrauchern mit intelligenten Messsystemen und einem Jahresstromverbrauch bis 10.000 kWh

Recht der Energiewirtschaft

Band 18 (2018)

Heft 9, S. 393–402

#### Beiträge in Sammelbänden

*Wehinger, Gregor D.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas:* Reaktoren für spezielle technisch-chemische Prozesse: Elektrochemische Reaktoren Handbuch chemische Reaktoren / Wladimir Reschetilowski

Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum

2018 – ISBN 978-3-662-56444-8 – S. 1–36

*Lietz, Franziska; Weyer, Hartmut:* EEG-Einspeisemanagement und Zwischenspeicherung in Batteriespeichern

Batteriespeicher – Rechtliche, technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen / Böttcher, Jörg; Nagel, Peter (Hrsg.)

Berlin, Boston: de Gruyter

2018 – ISBN 978-3-11-045848-0 – S. 367–387

*Weyer, Hartmut:* Die Bedeutung des Grundsatzes der Belastungsgleichheit für Umlagen Regulierender Staat und konfliktschlichtendes Recht. Festschrift für Matthias Schmidt-Preuß zum 70. Geburtstag / Markus Ludwigs (Hrsg.)

Berlin: Duncker & Humblot

2018 – ISBN 978-3-428-15156-1 – S. 1037–1055

*Weyer, Hartmut:* Sonderregelungen für Strom aus erneuerbaren Energien nach dem "Winterpaket" der Kommission

Recht und Energie. Liber Amicorum für Ulrich Büdenbender zum 70. Geburtstag / Peter Rosin, Arnd Uhle (Hrsg.)

Berlin, Boston: de Gruyter

2018 – ISBN 978-3-11-059635-9 – S. 293–322

#### Studien- und Abschlussarbeiten

*Struck, Torben:* Potentialanalyse für den Einsatz von industriellen Vanadium-Redox-Flow-Batterien, Masterarbeit  
2018

*Bin Hamdan, Nazmi:* Life cycle assessment of polyolefin film, nano spray and acrylate spray vehicle transport protection in accordance with ISO 14040/44, Masterarbeit  
2018

*Dorantes Ledesma, Miguel A.:* Contribution to the development of a life cycle cost model for vanadium redox flow batteries, Bachelorarbeit  
2018

*Zheng, Fangdi:* Untersuchung des Strömungsverhaltens in einer Redox-Flow Batterie, Masterarbeit  
2018

*Gou, Yang:* Numerical study of coupled THM/C processes related to geo-energy production, Dissertation  
2018

*Li, Mengting:* Optimization of multistage hydraulic fracturing treatment for maximization of the tight gas productivity  
2018

*Zielinski, Oliver:* Entwicklung einer Methode zur Herstellung von Vanadiumelektrolyten für Vanadium Redox-Flow Batterien (Masterarbeit)  
2018

*Martin, Jan:* Entwicklung von Methoden zur kontinuierlichen Elektrolytherstellung für den Einsatz in Vanadium Redox-Flow Batterien (Masterarbeit)  
2018

*Flaischlen, Steffen:* Synthetische Festbatterzeugung für CFD-Simulationen: Blender vs. DEM  
2018

*Brauns, Jörn:* Inbetriebnahme einer druckbetriebenen alkalischen Wasserelektrolyse und Untersuchung der Produktgasqualität (Masterarbeit)  
2018

*Dorantes Ledesma, Miguel Angel:* Contribution to the Development of a Life Cost Model for Vanadium Redox Flow Batteries (Bachelorarbeit)  
2018

*Qian, Jingcan:* Entwicklung von Gasdiffusions-elektroden für die Sauerstoffentwicklung in der alkalischen Wasserelektrolyse (Bachelorarbeit)  
2018

## Sonstige Publikationen

*Büchner, Jens; Nikogosian, Vigen; Schober, Dominik; Weyer, Hartmut; Woll, Oliver:* Neue Preismodelle für die Energiewirtschaft – Reform der Struktur von Netzentgelten und staatlich veranlasster Preisbestandteile

## Vorträge

*Prumbohm, Eva; Wehinger, Gregor D.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas:* Electrochemical and hydrodynamic modeling linked with optical measurements for flow field design improvement of vanadium redox-flow batteries, Poster

Gehalten am 24.09.2018

anlässlich Electrochemistry, 24.09.2018–26.09.2018 in Ulm

*Kroner, Isabelle; Turek, Thomas:* State of charge monitoring in a VFB by amperometric method, Electrochemistry

Gehalten am 24.09.2018

anlässlich Electrochemistry, 24.09.2018–26.09.2018 in Ulm

*Brauns, Jörg; Haug, Philipp; Turek, Thomas:* Dynamic simulation of an alkaline water electrolyzer

Gehalten am 24.09.2018

anlässlich Electrochemistry, 24.09.2018–26.09.2018 in Ulm

*Minke, Christine:* Redox-Flow-Batterien: Speicher für erneuerbare Energien

Gehalten am 20.09.2018

anlässlich 11. Niedersächsische Summer School Brennstoffzellen und Batterien in Braunschweig

*Fries, Ann-Kathrin; Kaiser, Frederike; Beck, Hans-Peter; Weber, Roman:* Huntorf 2020: Improvement of Flexibility and Efficiency

of a Compressed Air Energy Storage Plant based on Synthetic Hydrogen Gehalten am 20.09.2018

anlässlich NEIS 2018 – Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, 20.-21.09.2018

in Hamburg

*Brauns, Jörg; Haug, Philipp; Turek, Thomas:* Dynamische Simulation einer alkalischen Wasserelektrolyse

Gehalten am 13.09.2018

anlässlich ProcessNet-Jahrestagung, 13.09.2018 in Aachen

*Schafner, Katharina; Turek, Thomas:* Improvement of the long-term VFB operation by modelling crossover processes and development of capacity balancing methods

Gehalten am 02.09.2018

anlässlich 69th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, 02.09.2018 – 07.09.2018 in Bologna

*Prumbohm, Eva; Wehinger, Gregor D.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas:* Validated flow distribution analysis by a VFB model linked with optical measurements,

Gehalten am 10.07.2018

anlässlich International Flow Battery Forum, 10.07.2018–12.07.2018 in Lausanne, Schweiz

*Kroner, Isabelle; Turek, Thomas:* Monitoring the state of charge in a VFB with a novel amperometric sensor

Gehalten am 10.07.2018

anlässlich International Flow Battery Forum, 10.07.2018–12.07.2018 in Lausanne, Switzerland

*Schafner, Katharina; Turek, Thomas:* Improving the long-term vanadium flow battery operation by modelling crossover processes and capacity balancing methods

Gehalten am 10.07.2018

anlässlich International Flow Battery Forum, 10.07.2018–12.07.2018 in Lausanne, Switzerland

*Kubicka, Alexander.; Hickmann, Thomas; Kunz, Ulrich; Lanfranconi, M.; Schilde, C.; Seipp, T.; Tidau, M.; Zielinski, O.; Turek, Thomas:* Optimization study of embossed flow field structures on thin and flexible bipolar plates for an all vanadium flow battery

Gehalten am 10.07.2018

anlässlich International Flow Battery Forum, 10.07.2018–12.07.2018 in Lausanne, Switzerland

*Minke, Christine; Kunle, Eglantine; zum Hingst, Jens; Faulstich, Martin:* E-mobility adoption pathways in France, Germany and Norway – Comparative analysis of macro-environmental factors for knowledge transfer and best practice identification

Gehalten am 21.06.2018

anlässlich WCTRS SIG f2 International Conference: Transport, Climate Change and Clean Air, 21.-22.06.2018 in Paris, France

*Minke, Christine; Kunle, Eglantine; zum Hingst, Jens; Faulstich, Martin:* E-Mobilität in Frankreich im Vergleich mit Deutschland und Norwegen

Gehalten am 21.06.2018

anlässlich IONICA Congress: Fascination E-Mobilität, 21.-24.06.2018 in Zell am See, Austria

*Liu, Hejuan; Hou, Michael Z.; Were, Patrick; Li, Mengting:* Potential of CO<sub>2</sub> Aided Hot Water Extraction Technology in the Low-Medium

Temperature Geothermal Reservoirs in China  
Gehalten am 03.06.2018  
anlässlich 15th Annual Meeting Asia Oceania Geoscience Society, 03.-08.06.2018 in Hawaii, USA

*Minke, Christine; Peters, Jens F.; Baumann, Manuel; Weil, Marcel*: Environmental assessment of vanadium redox flow batteries

Gehalten am 13.05.2018  
anlässlich SETAC Europe 28th Annual Meeting 2018, 13 – 17 May 2018 in Rome, Italy

*Christine Minke, Peters, Jens F.; Baumann, Manuel; Minke, Christine; Weil, Marcel*: The relevance of the end-of-life stage for the environmental impact of batteries

Gehalten am 13.05.2018  
anlässlich SETAC Europe 28th Annual Meeting 2018, 13.-17.05.2018 in Rome, Italy

*Franz, Olaf; Hou, Michael Z.*: Erdöl- und Erdgasförderung mit Erdwärme

Gehalten am 18.04.2018  
anlässlich DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung, 18.-19.04.2018 in Celle

*Thomas Gimpel, Koj, Matthias; Gimpel, Thomas; Haug, Philipp; Schade, Wolfgang; Turek, Thomas*: Laser structured nickel-iron electrodes for oxygen evolution in alkaline water electrolysis

Gehalten am 14.03.2018  
anlässlich European Hydrogen Energy Conference EHEC, 14.03.2018 – 16.03.2018 in Malaga

## 2017

### Bücher

*Hou, Michael Z.; Li, M. T.; Gou, Yang; Feng, Wentao*: Numeric Investigations on Frac Propagation in Tight Gas Reservoirs with the FDM Program FLAC3D: Phase 4: Optimization of a complete frac-operation in a horizontal well for maximum productivity  
Hamburg: DGMK, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V

2019 - ISBN 978-3-947716-00-5  
(DGMK-Forschungsbericht)

*Hou, Michael Z.; Zhang, Can*: Kooperation zwischen der TU Clausthal und China  
Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger Verlag  
2019

*Fries, Ann-Kathrin; Wehrmann, Ernst-August; Beck, Hans-Peter*: Einsatzoptimierung des Druckluftspeicherkraftwerks  
Huntorf am Day-Ahead-Markt

Freiberg: Saxonia  
2019 - ISBN 978-3-934409-93-4

### Beiträge in referierten Fachzeitschriften

*Koj, Matthias; Gimpel, Thomas; Schade, Wolfgang; Turek, Thomas*: Laser structured nickel-iron electrodes for oxygen evolution in alkaline water electrolysis

International Journal of Hydrogen Energy  
Volume 44 (2019)  
Issue 25, S. 12671–12684

*Minke, Christine; Dorantes Ledesma, Miguel A.*: Impact of cell design and maintenance strategy on life cycle costs of vanadium redox flow batteries

Journal of Energy Storage  
Volume 21 (2019)  
S. 571–580

*Kaiser, Friederike; Krüger, Uwe*: Exergy analysis and assessment of performance criteria for compressed air energy storage concepts

International Journal of Exergy  
Volume 28 (2019)  
No. 3, S. 229 – 254

*Prumbohm, Eva; Wehinger, Gregor D.*: Exploring Flow Characteristics in Vanadium Redox-Flow Batteries: Optical Measurements and CFD Simulations

Chemie Ingenieur Technik, Special Issue: Elektrochemische Verfahrenstechnik  
Volume 91 (2019)  
Issue 6, S. 900-906

*Nedjalkov, Antonio; Meyer, Jan; Göken, Heiko; Reimer, Maximilian V.; Schade, Wolfgang*: Blueprint and Implementation of Rural Stand-Alone Power Grids with Second-Life Lithium Ion Vehicle Traction Battery Systems for Resilient Energy Supply of Tropical or Remote Regions

Materials  
Volume 12 (2019)  
Issue 16, S. 2642

*Liao, Jianxing; Gou, Yang; Feng, Wentao; Mehmood, Faisal; Xie, Yachen ; Hou, Michael Z.*: Development of a full 3D numerical model to investigate the hydraulic fracture propagation under the impact of orthogonal natural fractures

Acta Geotechnica  
Volume 15 (2019), S. 279–295

*Kroner, Isabelle; Becker, Maik; Turek, Thomas*: Monitoring the State of Charge of the Positive Electrolyte in a Vanadium Redox-Flow Battery with a Novel Amperometric Sensor

Batteries  
Vol. 5 (2019)

Issue 1, S. 5

*Bockelmann, Marina; Becker, Maik; Reining, Laurens; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas*: Passivation of Zinc Anodes in Alkaline Electrolyte: Part II. Influence of Operation Parameters  
Journal of The Electrochemical Society  
Vol. 166 (2019)  
Issue 6, S. A1132–A1139

*Flaischlen, Steffen; Wehninger, Gregor D.*: Synthetic Packed-Bed Generation for CFD Simulations: Blender vs. STAR-CCM+  
ChemEngineering – Bd.  
Vol. 3 (2019)  
Issue 2, S. 52

*Wehinger, Gregor D.; Flaischlen, Steffen*: Computational Fluid Dynamics Modeling of Radiation in a Steam Methane Reforming Fixed-Bed Reactor  
Industrial & Engineering Chemistry Research  
Vol. 58 (2019)  
Issue 31, S. 14410–14423

*Schafner, Katharina; Becker, Maik; Turek, Thomas*: Membrane resistance of different separator materials in a vanadium redox flow battery  
Journal of Membran Science  
Vol. 586 (2019)  
S. 106–114

*Düerkop, Dennis; Widdecke, Hartmut; Schmie-mann, Achim; Kunz, Ulrich; Schilde, Carsten*: Low-Cost-Membranen für die Vanadium-Redox-Flow-Batterie  
Chemie Ingenieur Technik  
Vol. 91 (2019)  
Issue 8, S. 1192–1197

*Koj, Matthias; Qian, Jingcan; Turek, Thomas*: Novel alkaline water electrolysis with nickel-iron gas diffusion electrode for oxygen evolution  
International Journal of Hydrogen Energy  
Vol. 44 (2019)  
Issue 57, S. 29862–29875

*Weyer, Hartmut; Iversen, Thore*: Regionale Flexibilitätsmärkte als Instrument des Engpassmanagements  
Recht der Energiewirtschaft  
Vol. 10 (2019)  
S. 485–492

### Beiträge in Sammelbänden

*Weyer, Hartmut*: Kommentierung zu §§ 30-33 EnWG  
Berliner Kommentar zum Energierecht, 4. Auflage / Säcker (Hrsg.)  
Frankfurt a.M.: Deutscher Fachverlag, Fachmedien Recht und Wirtschaft  
2019 – ISBN 978-3-8005-1653-7 -

*Krüger, Andreas; Weyer, Hartmut*: Kommentierung zu §§ 10, 25 ARegV  
Anreizregulierungsrecht, 2. Auflage / Holz-nagel; Schütz (Hrsg.)  
München: C.H.Beck  
2019 – ISBN 978-3-406-72584-5 -

*Lütke-Handjery, Alexander; Paust, Michael; Weyer, Hartmut*: Kommentierung zu § 23 ARegV  
Anreizregulierungsrecht, 2. Auflage / Holz-nagel; Schütz (Hrsg.)  
München: C.H.Beck  
2019 – ISBN 978-3-406-72584-5

### Studien- und Abschlussarbeiten

*Hübner, Fabian*: Ökobilanz der Wasserstoffherzeugung mittels alkalischer Wasserelektrolyse  
2019

*Blume, Nick*: Ökobilanz einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie, Projektarbeit  
2019

*Guo, Yanwen*: Auslegung Teilautarker Energiecluster mit Hilfe von Standardlastprofilen gespeist aus erneuerbaren Energien in MATLAB-Simulink, Bachelorarbeit  
2019

*Griemert, Rudolph*: Frequenzstabilitätsbetrachtung eines Multi-VSG-Systems am Beispiel eines Mehrknoten-Inselnetzes, Bachelorarbeit  
2019

*Krange, Steffen*: Untersuchungen zum Einfluss von Phosphat auf die Kinetik einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie (Bachelorarbeit)  
2019

### Vorträge

*Turek, Thomas*: Modellierung von Redox-Flow-Batterien – Von der Faser bis zum System  
Gehalten am 15.10.2019  
anlässlich DECHEMA Infotag Elektrochemische Reaktionstechnik, 15.10.2019 in Frankfurt

*Brauns, Jörn; Turek, Thomas*: Betriebsstrategien und Auslegungskriterien für die alkalische Wasserelektrolyse in Kombination mit erneuerbaren Energien  
Gehalten am 15.10.2019  
anlässlich DECHEMA Infotag Elektrochemische Reaktionstechnik, 15.10.2019 in Frankfurt am Main

*Minke, Christine*: Fallstudienarbeit im Ingenieurwesen – Aktivierung, Partizipation, Kompetenzerwerb

- Gehalten am 26.09.2019  
anlässlich 4. Symposium zur Hochschul-  
lehre in den MINT-Fächern, 26.–27.09.2019  
in Nürnberg
- Brauns, Jörn; Koj, Matthias; Turek, Thomas*: New  
Developments in Alkaline Water Electrolysis  
Gehalten am 15.09.2019  
anlässlich GDCh-Wissenschaftsforum Che-  
mie, 15.09.2019 – 18.09.2019 in Aachen
- Kroner, Isabelle; Krange, Steffen; Turek, Thomas*:  
Einfluss von Phosphat auf die Kinetik in einer  
Vanadium Redox-Flow Batterie  
Gehalten am 15.09.2019  
anlässlich GDCh-Wissenschaftsforum Che-  
mie, 15.09.2019–18.09.2019 in Aachen
- Kroner, Isabelle; Krange, Steffen; Turek, Thomas*:  
Studies on the influence of phosphate on  
the kinetics in a vanadium redox flow bat-  
tery  
Gehalten am 04.08.2019  
anlässlich International Society of Electro-  
chemistry, 04.08.2019–09.08.2019 in Dur-  
ban, South Africa
- Brauns, Jörg; Turek, Thomas*: Dynamic operation  
strategies and design criteria for alkaline  
water electrolyzers powered by renewable  
energies  
Gehalten am 13.06.2019  
anlässlich 2nd International Conference on  
Electrolysis, 13.06.2019 in Loen, Norway
- Brauns, Jörg; Turek, Thomas*: Dynamic operation  
strategies for alkaline water electrolyzers  
powered by renewable energies  
Gehalten am 27.05.2019  
anlässlich Jahrestreffen Reaktionstechnik,  
27.05.2019–29.05.2019 in Würzburg
- Flaischlen, Steffen; George, G.; Wehinger, Gregor  
D.*: Synthetic packed beds for CFD Simulati-  
ons: Rigid body vs. soft body approach  
Gehalten am 27.05.2019  
anlässlich Jahrestreffen Reaktionstechnik  
2019, 27.05.2019–29.05.2019 in Würzburg
- Flaischlen, Steffen; George, G.; Wehinger, Gregor  
D.*: Synthetic packing generation for CFD-  
Simulations: Blender vs. DEM  
Gehalten am 08.05.2019  
anlässlich Clausthal-Göttingen Internatio-  
nal Workshop on Simulation Science 2019,  
08.05.2019–10.05.2019 in Clausthal-Zeller-  
feld
- Hou, Michael Z.; Mehmood, F.; Liao, J.*: Nume-  
rical and Model-Physical Investigations on  
Innovative Frac-Technologies with Alterna-  
tive Frac-Fluids for Tight Gas Formations and  
Re-fracturing Options  
Gehalten am 25.04.2019  
anlässlich DGMK/ÖGEW Frühjahrstagung,  
25.–26.04.2019 in Celle
- Minke, Christine*: Ökonomische und ökologische  
Bewertung von Vanadium-Redox-Flow-Bat-  
terien  
Gehalten am 11.04.2019  
anlässlich DECHEMA Redox-Flow-Infotag in  
Frankfurt
- Prumbohm, Eva; Wehinger, Gregor. D.; Kunz,  
Ulrich; Turek, Thomas*: Strömungsvisuali-  
sierung und -modellierung in Vanadium-  
Redox-Flow-Batterien  
Gehalten am 11.04.2019  
anlässlich Let it flow: Infotag Redox-Flow-  
Batterien, 11.04.2019 in Frankfurt a.M.
- Kubicka, Alexander; Hickmann, Thorsten; Kunz,  
Ulrich; Lanfranconi, Michael; Schilde, Carsten;  
Seipp, Thorsten; Tidau, Marius; Zielinski, Oli-  
ver; Turek, Thomas*: High-Power Vanadium-  
Redox-Flow Batterie  
Gehalten am 11.04.2019  
anlässlich Let it flow: Infotag Redox-Flow-  
Batterien, 11.04.2019 in Frankfurt a.M.
- Prumbohm, Eva; Wehinger, Georg D.; Kunz,  
Ulrich; Turek, Thomas*: Strömungsvisuali-  
sierung und -modellierung in Vanadium-  
Redox-Flow-Batterien  
Gehalten am 11.04.2019  
anlässlich Infotag Redox-Flow-Batterien,  
11.04.2019 in Frankfurt am Main
- Kroner, Isabelle; Krange, Steffen.; Turek, Thomas*:  
Einfluss von Phosphat auf die Kinetik in einer  
VRFB  
Gehalten am 11.04.2019  
anlässlich Let it flow: Infotag Redox-Flow-  
Batterien, 11.04.2019 in Frankfurt am Main
- Flaischlen, Steffen; Wehinger, Gregor D.*: Synthe-  
tic Fixed-Beds for CFD-Simulations: Blender  
vs. DEM  
Gehalten am 19.03.2019  
anlässlich Jahrestreffen der ProcessNet-Fach-  
gruppen Computational Fluid Dynamics  
2019, 19.03.2019-20.03.2019 in Frankfurt  
a.M.
- Minke, Christine*: Proposing a mass-specific  
accounting approach for integrated LCA  
and LCC of redox flow batteries  
Gehalten am 14.03.2019  
anlässlich The International Conference on  
Innovative Applied Energy – IAPE 2019, 14 –  
15 March 2019 in Oxford, UK
- Brauns, Jörg; Turek, Thomas*: Dynamic process  
modeling of an alkaline water electrolyzer  
Gehalten am 13.03.2019  
anlässlich 16th Symposium on Modeling  
and Experimental Validation of Electroche-  
mical Energy Technologies, 13.03.2019 in  
Braunschweig
- Minke, Christine*: Economic and environmental  
assessment of vanadium redox flow batteries

Gehalten am 12.03.2019

anlässlich Danish Battery Symposium in Aarhus, Denmark

*Prumbohms, Eva; Wehinger, Gregor D.; Kunz, Ulrich; Turek, Thomas: Observation and simulation of the flow distribution in a vanadium redox-flow battery*

Gehalten am 12.03.2019

anlässlich 16th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies, 12.03.2019–13.03.2019 in Braunschweig



## 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

### **Lektorat**

wortschmiedin.de, Sandra Köhler

### **Layout und Satz**

Melanie Bruchmann

### **Bildnachweis**

Adobe Stock: Titelbild (©malp), S. 4; 8; 12; 14; 84; 88  
Olaf Möldner: S. 10; 11

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

### **Druck**

Quedlinburg Druck GmbH

März 2020

