



TU Clausthal

EST

Forschungszentrum
Energiespeichertechnologien

Jahresbericht 2020/2021

des Forschungszentrums
Energiespeichertechnologien (EST)



Jahresbericht 2020/2021
des Forschungszentrums
Energiespeichertechnologien (EST)

Inhalt

1. Entwicklung der Forschungsagenda	5
2. Geschäftsbericht und Infrastruktur	9
3. Strategiebildende Forschungsprojekte in den Jahren 2020/2021	13
CLiMb: Katalytische und mikrobielle Methanisierung als Basis für eine nachhaltige Energiespeicherung	14
GridBatt: Batterietechnologien zur Sicherstellung eines sicheren Netzbetriebs	22
RiskBatt: Risikoanalyse für lithiumbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase	29
EWAZ: Energie- und Wasserspeicher Harz	34
Huntorf2020: Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff	39
SINTEG-Projekt enera – Teilprojekt Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft	45
SiNED – Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation	48
Re3dOx – Recycling und Ressourceneffizienz bei der RedOx-Flow-Batterie	52
Polymerelektrolytmembranen (PEM) für Vanadium-Redox-Flow-Batterien	55
Zink-Luft-Akkumulator als sicherer elektrochemischer Speicher für emissionsarme und explosionsgeschützte Industriebereiche	59

StaR – Stack Revolution	64
Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden.....	67
Konzentrationsabhängige Industrieofenregelung – Teilvorhaben: Sensorschicht- und Sensorentwicklung im Labormaßstab	71
LOReley: Leistungsdichte H ₂ -Freisetzung in LOHC-Reaktoren mittels effizienter Flächenkatalysatoren	76
FemtoPEM: Optimierung poröser Transportschichten für die PEM-Elektrolyse mittels Femtosekundenlaser-Oberflächenstrukturierung.....	79
FemtoPlat: Verdampfung und Kondensation in Plattenwärmeübertragern mit funktionalisierten Oberflächen aus einem Femtosekundenlaserprozess	82
MoBat: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik	85
4. Wissenstransfer in die Praxis	91
Batteriesicherheitsforschung für die Praxis	92
GET H ₂ – Initiative für den Aufbau einer bundesweiten H ₂ -Infrastruktur.....	94
Regionaler Wissenstransfer: Das Unternehmernesspräch ENERGIE.....	96
Second-Life-Lithium-Batterien und Photovoltaik für saubere Energie in Sub-Sahara Afrika...	98
5. Schlaglichter	101
6. Anhang.....	105

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 2020/21

Im Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) wurden gemäß der strategischen Forschungsagenda die Aktivitäten in den Bereichen Batterie- und Wasserstoffforschung mit neuen Projekten und zusätzlicher apparativer Infrastruktur weiter ausgebaut.

Aufbauend auf den strategischen Vorarbeiten der vergangenen Jahre konnte das EST gemeinsam mit dem CUTEC-Forschungszentrum und weiteren Instituten der Hochschule einen großen Erfolg verbuchen: So werden vier Clausthaller Arbeitsgruppen in den fünf „Innovationslaboren Wasserstoff“ von der Niedersächsischen Landesregierung gefördert, welche vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen koordiniert werden. Ziel dieser Verbünde ist es, die verschiedenen Kompetenzen im Bereich Wasserstofftechnologien zu bündeln und die Wasserstoffforschung in Niedersachsen weiterzuentwickeln. Der Verbund „H₂-Wegweiser Niedersachsen“ wird am CUTEC-Forschungszentrum koordiniert und unter Beteiligung mehrerer Arbeitsgruppen des EST disziplinübergreifend bearbeitet. Weitere Projekte mit Beteiligung von Arbeitsgruppen des EST sind „H₂-Region Nordwest-Niedersachsen“, „Nachhaltige Wasserstoff-Verbrennungskonzepte“ sowie das „Innovationslabor Wasserelektrolyse: Vom Material zum System“, welches gemeinsam mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut Goslar bearbeitet wird. Insbesondere das EST-interne grundlagenorientierte Verbundprojekt „Katalytische und mikrobielle Methanisierung als Basis für die Entwicklung nachhaltiger Energiespeicher“ stellte dabei einen wesentlichen inhaltlichen Grundpfeiler dieses Erfolges dar und soll mit Fokus auf die Sensorik perspektivisch in die Beantragung einer DFG-Forschungsgruppe der beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler münden.

Einen weiteren deutlichen Schub erfuhr die wasserstoffbezogene Forschung des EST auch mit der Bewilligung des Verbundprojekts „Stack Revolution“ im Rahmen der Förderinitiative „Wasserstoffrepublik Deutschland“ der Bundesregierung. Gemeinsam mit den Projektpartnern, der OTH Regensburg, der RWTH Aachen, der Hochschule Rhein-Waal, der TU Dortmund und dem Start-up WEW GmbH, werden neue

Designs und Produktionsverfahren von Elektrolyse-Stacks als Herzstück jeder Wasserelektrolyseanlage ganzheitlich untersucht. Durch neu zu entwickelnde praxistaugliche Herstellungsverfahren soll hierdurch grüner Wasserstoff wettbewerbsfähig werden. Mit dem Vorhaben ist ein auch substanzieller Ausbau der Forschungsinfrastruktur des EST verbunden: So entsteht auf einer Fläche von 250 Quadratmetern ein neues Testfeld zur Auswahl und Charakterisierung von Materialien und Zellen sowie eine Technikumsanlage zur Untersuchung des neuen Stackdesigns. Im Rahmen eines Eigenprojekts des EST soll der entstehende Wasserstoff über ein BHKW im EST nachgenutzt werden, und dadurch u.a. die Energie- und Klimabilanz des EST verbessern zu können.

Im Rahmen der Bundesinitiative „Forschungsfabrik Batterie“ erhielt das EST gemeinsam mit dem Fraunhofer-Heinrich-Hertz Institut (HHI) Goslar den Förderbescheid für eine umfassende Erweiterung der Experimentalumgebung im Batterietestzentrum. Zukünftig lassen sich Batteriemodule aus neuartigen Hochleistungszellen unter klimatisch kontrollierten Umgebungsbedingungen und mithilfe anwendungsgerechter Strombelastungsprofile durch Impedanzmessungen und faseroptischer Analysen hinsichtlich ihres Zustandes auf Modul- und Einzelzellebene umfassend charakterisieren. Durch diese Zusammenführung elektrischer und optischer Messverfahren soll ein deutlich höherer Detailgrad in der Abbildung der Batteriezustandseigenschaften erreicht werden. Die neuen Anlagen verfügen auch über ein System zur Bewältigung etwaiger Havarien in untersuchten Batteriezellen bei Analysen außerhalb der Spezifikationen.

Mit dem Aufbau des vorgenannten Wasserelektrolyse-Technikums, der Erweiterung der Infrastruktur im Batterietestzentrum sowie dem parallel erfolgten Ausbau der Aktivitäten im Bereich der 2nd-Life-Batteriespeicher gingen weitere räumliche Veränderungen einher: So nahmen die thermischen Versuchsanlagen des Batterietestzentrums Ende des Jahres ihren Forschungsbetrieb an einem neuen Standort, der ehemaligen Erzaufbereitungsanlage der Preussag AG am Bollrich, in unmittelbarer Nähe des Ener-

gieCampus, auf. Dieser Standort wird zugleich als Reallabor für ein zukünftiges CO₂-neutrales Testzentrum aufgebaut, da hier für die Energieversorgung im Sinne der „Circular Economy“ aufbereitete Fotovoltaikanlagen und Batteriespeicher in ihrem zweiten Lebenszyklus großtechnisch zur Anwendung kommen werden.

Das hier realisierte Konzept der autarken, d.h. vom Netz unabhängigen Energieversorgung mit 2nd-Life-Komponenten, basiert auch auf Vorarbeiten und Erfahrungen, wie sie in Vorjahren bspw. im technischen Demonstrations- und Entwicklungshilfeprojekt auf der tansanischen Insel Kimbumba im Viktoriasee unter extremen klimatischen Bedingungen gemacht wurden. Auch diesbezügliche Aktivitäten wurden in den zurückliegenden zwei Jahren fortgeführt. So wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer HHI zwischenzeitlich ein solarenergiegespeicherter Energiecontainer mit Batteriespeicher und einer integrierten Wasseraufbereitung entwickelt, der auf diese Weise in Entwicklungsländern eine ausgesprochen kostengünstige saubere Trinkwasserproduktion von bis zu 2000 Litern pro Tag ermöglichen wird. Die Entwicklung dieses Produkts wird durch einen Aufbau eines spezifischen Qualifikationsprogramms flankiert, sodass zukünftige Arbeiten an installierten Anlagen durch einheimisches qualifiziertes Personal durchgeführt werden können.

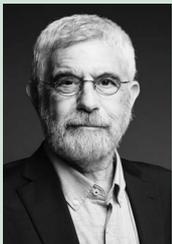
Neben diesen stark anwendungsbezogenen Aktivitäten konnte aber auch die materialorientierte Grundlagenforschung am EST erfolgreich ausgebaut werden. Besonders zu erwähnen ist

dabei von der TU Clausthal koordinierte und am EST angesiedelte DFG-Forschungsgruppe 5044 „Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden“. Die Ziele der Forschungsgruppe unter Beteiligung der Universität Osnabrück, der Technischen Universität Dresden, dem Leibniz-Institut für Kristallzüchtung Berlin sowie weiteren nationalen und internationalen Partnern bestehen im Verständnis der Korrelation von Defektstrukturen, des elektronischen und atomaren Transports sowie der akustischen Verluste in polaren Oxiden über einen großen Temperaturbereich, um auf Basis der hier erzielten Erkenntnisse zukünftig neue Konzepte bspw. für Sensoren im Hochtemperaturbereich entwickeln zu können.

Zum Jahresausklang hat das EST als erstes Forschungszentrum der TU Clausthal die Verhandlungen mit dem Präsidium der Hochschule über eine neue Ziel- und Leistungsvereinbarung ab dem Jahr 2023 aufgenommen. In diesem Kontext wird mit den verfügbaren personellen, räumlichen und apparativen Ressourcen auch die strategische Forschungsagenda des EST weiterentwickelt. Nach der in den vergangenen Jahren erfolgten Fokussierung auf primär technologische Fragestellungen werden zukünftig auch nicht-technologische Aspekte wie etwa Akzeptanz und Nachhaltigkeitsbewertungen (wieder) stärker in die disziplinübergreifende Forschung des EST einfließen. Bereits bestehende Alleinstellungsmerkmale des EST werden mittels dieser breiter angelegten Kooperation in größeren Verbänden weiter ausgebaut und damit die Sicherbarkeit der Einrichtung erhöht.

Vorstand des EST 2020–2023:

Vorsitzender



Prof. Wolfgang Schade

Mitglieder



Prof. Leonhard Ganzer



Prof. Thomas Turek



Heike Stucki-Bammel

Sebastian Schlack

Vertreterin
MTV Personal

Vertreter
wiss. Personal





GESCHÄFTSBERICHT UND INFRASTRUKTUR

2.

Geschäftsbericht 2020/2021

Die vergangenen zwei Jahre zeichneten sich, trotz der allgemeinen Einschränkungen durch die Corona-Pandemie, durch einen substanziellen Ausbau der Forschungsaktivitäten in den Themenfeldern Batterie- und Wasserstoffforschung sowie dem Ausbau der dazugehörigen Forschungsinfrastruktur aus.

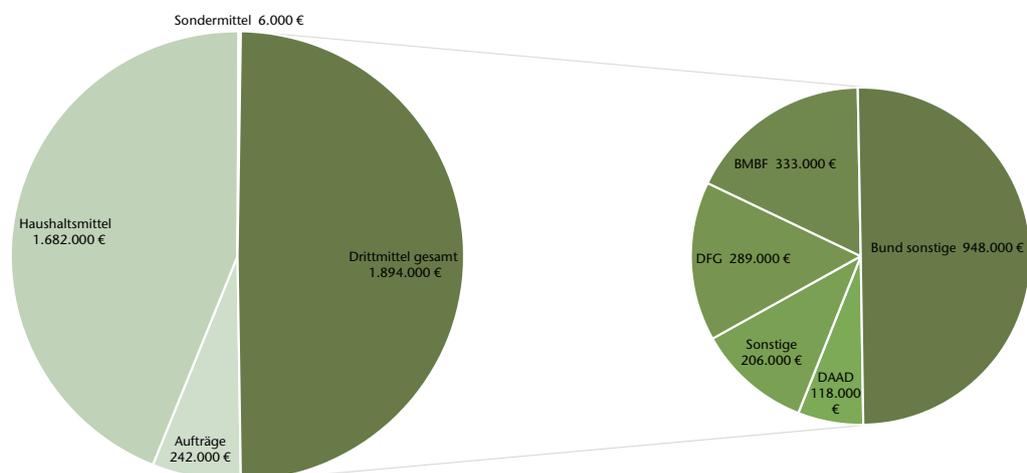
Neben einigen Neubewilligten Projekten aus der Förderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft sowie Fördermitteln des Bundes sind insbesondere die Erfolge in den vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten „Innovationslaboren für Wasserstofftechnologien“ zu nennen. So sind über das EST verbundene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an vier der insgesamt fünf geförderten Verbünde beteiligt. Insbesondere in dem vom CUTEC-Forschungszentrum koordinierten Verbund „H2-Wegweiser Niedersachsen“ fließt dabei die disziplinübergreifende Expertise des EST ein. Ein weiteres Highlight stellt die Beteiligung des EST im Leitprojekt „H2Giga“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) als Teil der Wasserstoffstrategie des Bundes dar. Zur Weiterentwicklung der alkalischen Wasserelektrolyse wird im Rahmen des in diesem Bericht beschriebenen Forschungsprojekts „StaR – Stack Revolution“ seit Sommer 2021 in den Räumlichkeiten des benachbarten Batterie- und Sensoriktestzentrums in Goslar ein Wasserelektrolyseteststand im Industriemaß-

stab aufgebaut, mit dessen Hilfe u.a. optimierte Material- und Stackdesigns für eine kostengünstigere Erzeugung von Wasserstoff durch Nutzung erneuerbarer Energien untersucht werden sollen.

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Batterie2050“ fördert das BMBF zudem den Ausbau der Forschungsinfrastruktur für Belastungsuntersuchungen an Batteriespeichern. So wird gemeinsam mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut eine neuartige Experimentierumgebung für Batteriemodule aus innovativen Hochleistungszellen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen und mit anwendungsgerechter Strombelastungsprofile aufgebaut, welche durch die Zusammenführung elektrischer und optischer Messverfahren einen höheren Detailgrad in der Abbildung der Batteriezustandseigenschaften erreichen soll, als es bislang möglich war.

Auch in den Jahren 2020 und 2021 verfügte das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien auf Basis der mit Präsidium geschlossenen und weiterhin gültigen Zielvereinbarung über einen jährlichen Etat aus Haushaltsmitteln von rund 1,60 Millionen Euro für Personal- und Sachkosten. Dieser konnte im Berichtszeitraum durch budgetwirksame eingeworbene Drittmittelträge im jeweiligen Jahr mehr als verdoppelt werden. Trotz der erheblichen pandemie-

Zusammensetzung des Gesamtbudgets 2020



Mitarbeiter:innen der EST-Geschäftsstelle 2020/21:

Leitung



Dr. Jens-Peter Springmann
Administrativer Geschäftsführer

Verwaltung



Fee Strahler



Heike
Stucki-Bammel

Bibliothek



Nadine
Kleinander

Anika Röhrig



Kevin Maib



Wolfgang Schrader

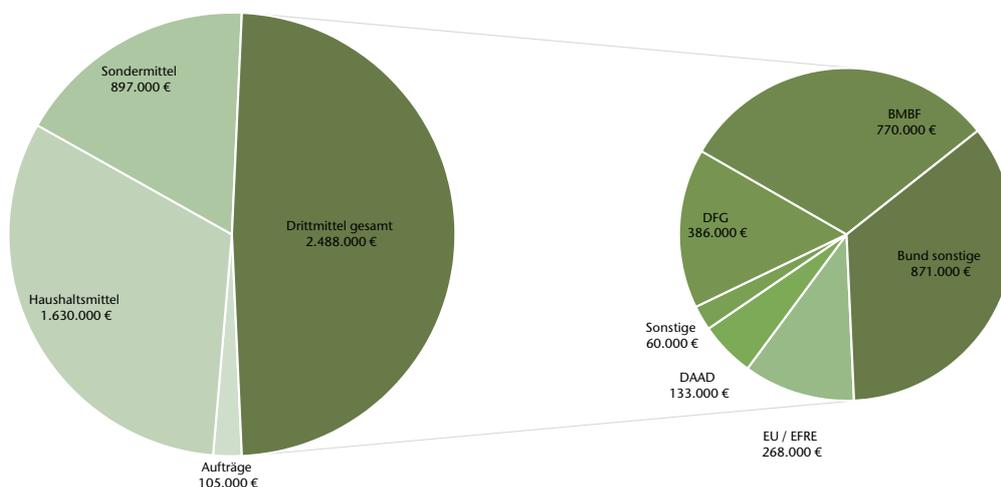
Technik

bedingten Einschränkungen konnte das Niveau der eingeworbenen Drittmittel gegenüber dem vorherigen Berichtszeitraum 2018/19 noch um ca. 8% gesteigert werden. Der Rückgang der Industrieaufträge im Jahr 2021 ist dabei im Wesentlichen auf die Errichtung des neuen Standortes für die thermischen Versuchsanla-

gen des Batterietestzentrums zurückzuführen, so dass die Anlagen in der zweiten Jahreshälfte nicht zur Verfügung standen.

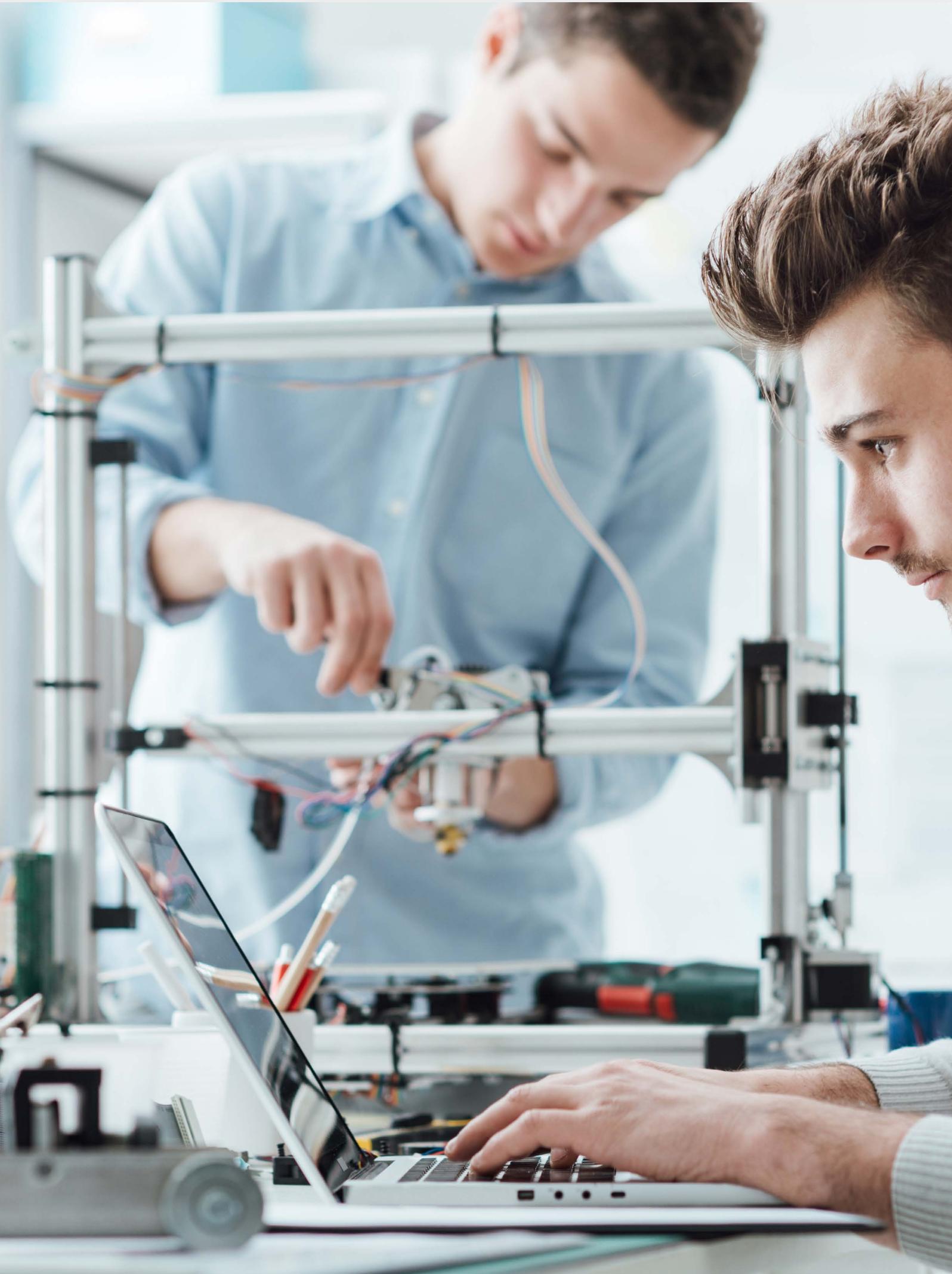
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Zusammensetzung der Jahresbudgets im Berichtszeitraum auf.

Zusammensetzung des Gesamtbudgets 2021



[Anmerkung: 2021, vorläufig]

Mit den Erfolgen in der Drittmittelinwerbung war auch eine positive Entwicklung des Personalbestandes verbunden: Waren am EST im Jahre 2019 noch insgesamt 43 Personalstellen (Vollzeitäquivalente) besetzt, davon 37 Stellen im wissenschaftlichen und 6 Stellen im nicht-wissenschaftlichen Bereich, so wuchs der Personalbestand bis auf 48 Stellen Jahr 2021 an, davon 44 Stellen im wissenschaftlichen und 4 Stellen im nicht-wissenschaftlichen Bereich.





STRATEGIEBILDENDE FORSCHUNGS- PROJEKTE IN DEN JAHREN 2020/2021

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 important 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, providing a basis 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 sich ändernde Wetterlagen und tägliche sowie saisonale Schwankungen, 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 zu Wasserstoff einen höheren Brennwert und die Infrastruktur für den Transport ist in Deutschland bereits 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)
- Institute of Subsurface Energy Systems (Prof. Dr. Ganzer)
- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (Prof. Dr. Schade)
- 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 dieses Verständnis aufzubauen, werden beide Prozesse experimentell und mit Hilfe von numerischer Modellierung und Simulation untersucht.

Die experimentellen Studien sind dabei in folgende zwei Prozesse unterteilt: zum einen 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, Sprecher des Gesamtprojektes und Leiter des experimentellen Teils der Untergrundmethanisierung ist Prof. Ganzer (Institute of Subsurface Energy Systems). 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. Dieses wird für die Untergrundmethanisierung von der Arbeitsgruppe des Instituts für Mathematik, geleitet von Prof. Ippisch, durchgeführt. Die Entwicklung der In-situ-Sensorik, als letztes Teilprojekt, wird von Prof. Schade (Institut für Energieforschung und Physikalische Technologie) geleitet.

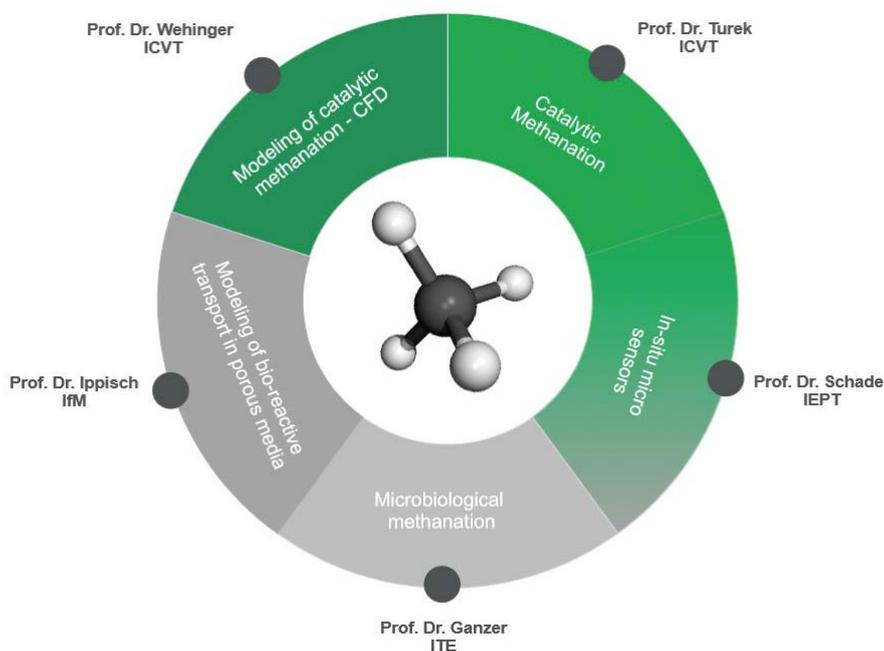


Abbildung 1: Projektstruktur des Verbundprojektes CLiMb.

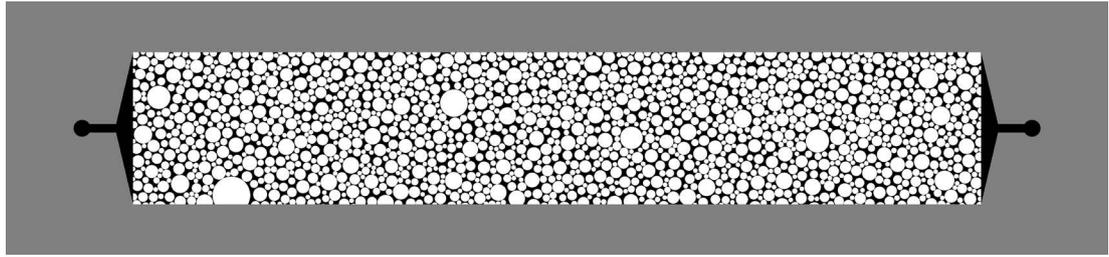


Abbildung 2: Struktur des linearen Mikromodells, welches für die Wachstumsexperimente verwendet wurde; weiß = Körner, schwarz = Porenraum, Dimensionen: 60 x 15 x 0,05 mm.

Untergrund Methanisierung (TP1)

Das Institute of Subsurface Energy Systems untersucht das grundlegende mikrobielle Verhalten in porösen Strukturen, um Risiken und Potenzial des Methanisierungsprozesses abschätzen zu können. Dabei wurde zunächst das mikrobiologische Wachstum von methanbildenden Bakterien (methanogenen Archaeen) in Batch-Experimenten angeregt,

um ein funktionierendes Wachstum als Grundlage zu gewährleisten. Folgend wurde das Wachstum der Mikroben in Glas-Silizium-Glas-Mikromodellen untersucht. Das Mikromodell repräsentiert in den Experimenten das poröse Medium und erlaubt gleichzeitig die visuelle Untersuchung von Fluidphasenbewegungen und mikrobiellem Wachstum. Für das Teilprojekt wurde ein Mikromodell basierend auf der Korngrößenverteilung eines realen Sandsteines entworfen und hergestellt. Die Struktur dieses Modelles ist in Abbildung 2 gezeigt.

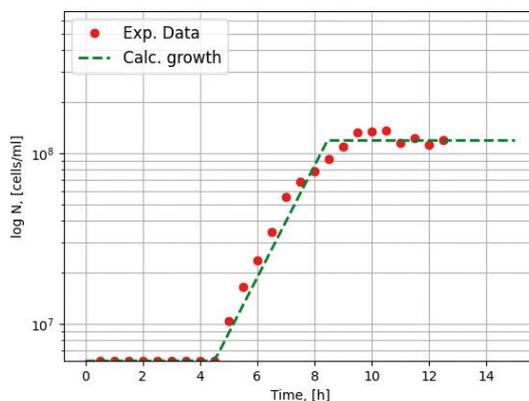
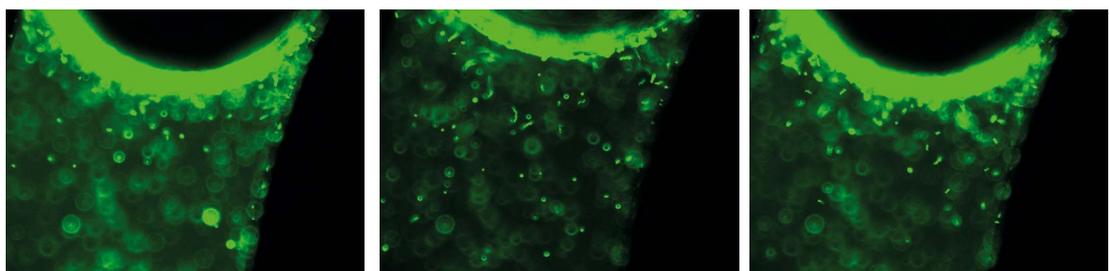


Abbildung 3: a)-c): Wachstum der methanogenen Archaeen aufgenommen in einem Mikromodell; grün = Mikroben, schwarz = Silizium/Gasphase; Wachstumskurve errechnet basierend auf Bildanalyse der oben gezeigten Position.

In der ersten experimentellen Versuchsreihe wurde das Wachstums unter statischen Bedingungen untersucht. Dabei wurden die methanogenen Archaeen in das Mikromodell injiziert und im Folgenden die wässrige Phase teilweise durch ein Wasserstoff/Kohlenstoffdioxid-Gasgemisch verdrängt. Sobald die Sättigungen der Phasen in dem Mikromodell zeitlich konstant waren (meistens bei 75 % Gassättigung), wurde das Mikromodell eingeschlossen und das Wachstum der Mikroben mit Hilfe eines Mikroskops über die Zeit der Wachstumsphase aufgenommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Wachstum der Mikroben in drei Phasen erfolgt: Beginnend mit der Lag-Phase, in welcher kein Wachstum stattfindet, gefolgt von der exponentiellen Wachstumsphase, in welcher die Anzahl der Mikroben



a): Reflektion der Mikroben nach 2 h; Aufgenommen mit 40x Vergrößerung. b): Reflektion der Mikroben nach 6 h; Aufgenommen mit 40x Vergrößerung. c): Reflektion der Mikroben nach 10 h; Aufgenommen mit 40x Vergrößerung.

stark zunimmt und schlussendlich der stationären Phase, in welcher kein Wachstum mehr festzustellen ist. Anhand der errechneten Wachstumskurve konnten die Dauer der Lag-Phase und die maximale Wachstumsrate für zwei verschiedene Spezies ermittelt werden. Diese sind für die Bewertung des Methanisierungsprozesses in porösen Medien und für die numerische Modellierung in Teilprojekt 2 wichtig.

Neben der allgemeinen Untersuchung des mikrobiellen Wachstumsverhaltens wurde festgestellt, dass das Wachstum räumlich nicht homogen stattfindet, sondern sich lokal unterscheiden kann. Dabei gibt es einerseits einen Unterschied in der errechneten Wachstumsrate der Mikroben an unterschiedlichen Positionen im Mikromodell, aber auch eine unterschiedliche Anzahl von Mikroben innerhalb der wässrigen Phase. Es wurde festgestellt, dass sich innerhalb eines eingeschlossenen wässrigen Bereichs ein abfallender Gradient von Mikroben weg von der Gas-Wasser-Grenzfläche ausbildet, welcher auf die erhöhte Substratkonzentration an der Grenzfläche zurückzuführen ist.

Ein Vergleich dieses Gradienten zwischen den statischen Experimenten und den folgenden dynamischen Experimenten, in denen das Modell nicht eingeschlossen, sondern die Gasphase kontinuierlich ausgetauscht wurde, zeigt einen noch stärkeren Gradienten in der wässrigen Phase. Die Untersuchungen der dynamischen Experimente sind noch nicht abgeschlossen und werden im nächsten Schritt durch eine Gasanalyse erweitert, um Reaktionsraten zu messen und darauf basierend Ausbeutekoeffizienten zu errechnen.

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 und des Kohlenstoffdioxids in Methan ist ein Multiskalenproblem. Der Hauptteil des Prozesses findet auf der Porenskala statt. Das dazu entwickelte Porenmodell, ein System von partiellen Differentialgleichungen (PDE) mit den Hauptbestandteilen Diffusion sowie Reaktion, kann ausgedrückt werden durch

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} - \operatorname{div}(D_i(x)\nabla u) = R_i(u),$$

wobei $u: [0, T] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^N$ die zeit- und ortsabhängige Konzentration der Bakterien, des Wasserstoffs, des Kohlenstoffdioxids sowie des Methans beschreibt. Die Diffusionsfunktionen $D_i: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ sind durch eine ausreichend hohe Auflösung und die Verteilung von Fest-, Flüssig- und Gasphasen des zu simulierenden Experiments gegeben. Beim Austausch zwischen wässriger und gasförmiger Phase wird das Henry'sche Gesetz genutzt. Das Reaktionsmodell $R: \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ beschreibt den mikrobiellen Metabolismus und wird mithilfe der Michaelis-Menten-Kinetik modelliert. Um ein entsprechend komplexes, da hochauflösendes, Problem numerisch lösen zu können, wird das sogenannte Operator Splitting angewendet. Dadurch lässt sich die nichtlineare PDE aufteilen in mehrere lineare PDE sowie eine nichtlineare gewöhnliche Differentialgleichung (ODE). Während die linearen PDE örtlich mit der „cell-centered Finite-Volume-Methode“ diskretisiert und zeitlich mit einem diagonal impliziten Runge-Kutta-Verfahren gelöst werden, wird die nichtlineare ODE mit dem Runge-Kutta-Fehlberg-Verfahren gelöst; einem Runge-Kutta-Verfahren höherer Ordnung mit automatisierter Zeitschrittweitensteuerung.

Da das Problem bei höherer Auflösung die Kapazitäten eines Prozessors insofern überschreitet, als dass die Laufzeit zu groß wird, wird das Problem mithilfe von Parallelrechnern gelöst. Die dafür notwendige Anpassung des Codes sowie Optimierungsschritte zur effektiven parallelen Lösung des Problems wurden umgesetzt.

Mithilfe von Reaktionsparametern sowie Bildern des Experimentaufbaus von Teilprojekt 1 wurden erste Simulationen durchgeführt. Die absolute Anzahl an Bakterien im Experiment dargestellt über die Zeit, d.h. die Funktion $v_x(t): [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ definiert über

$$v_x(t) := \int_{\Omega} u_x(t, x) dx,$$

mit u_x als Bakterienkonzentration, kann Graphik 1 entnommen werden.

Während das vereinfachte Wachstumsmodell die experimentellen Daten in logarithmischer Skalierung mit einer stückweisen linearen Funktion bestmöglich approximiert, ergibt das hochauflösende Modell ein mittleres Wachstum, welches eher dem experimentellen Verlauf entspricht.

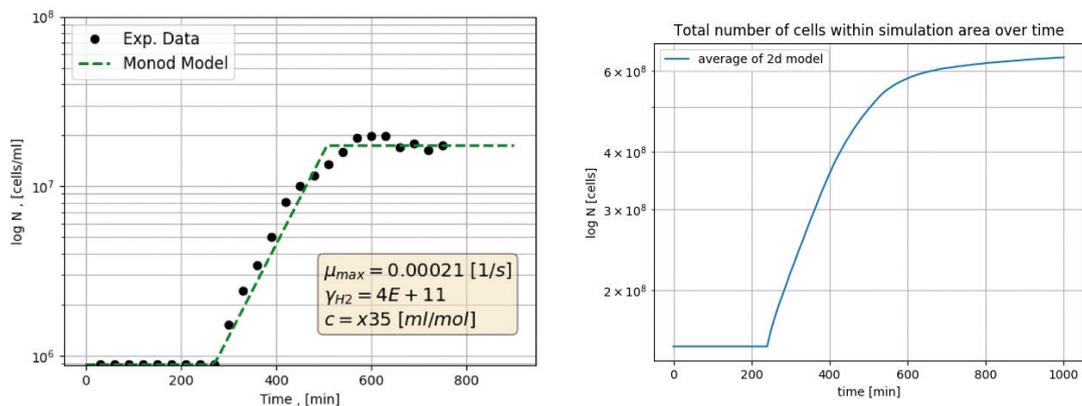


Abbildung 4: links: Bakterienkonzentration aus dem Experiment (schwarze Punkte) sowie aus dem vereinfachten Simulationsmodell (grüne, gestrichelte Linie); rechts: Gemittelte Bakterienkonzentration aus dem hochauflösenden Modell (blaue Linie).

Als nächster Schritt ist die Simulation mit konstantem Fluss von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid geplant. Die beim Lösen jenes Problems mit dem dafür bisher genutzten Modell bei entsprechend hoher Anzahl an Prozessen auftretenden numerischen Probleme sollen zeitnah gelöst werden. Die Ergebnisse aus den ersten Simulationen sowie die Erkenntnisse insbesondere über die Bakterienverteilung während des Wachstums werden in einer gemeinsamen Publikation mit Teilprojekt 1 veröffentlicht.

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. Danach 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 sie 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 5) 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. Er wird dann im

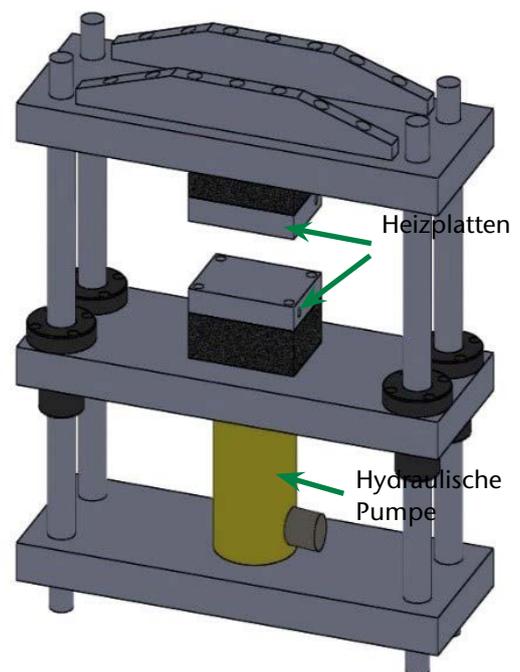


Abbildung 5: CAD-Modell der Presse für das Verkleben der Fluidstrukturen.

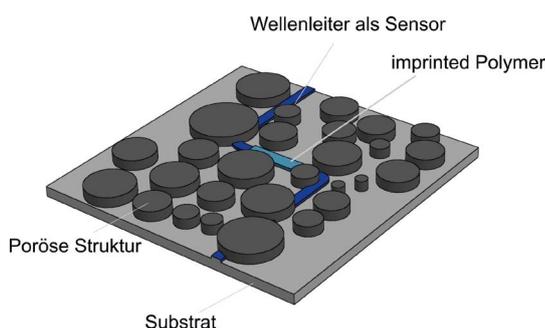


Abbildung 6: Aufbau der Fluidstrukturen mit Sensorik.

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 erhitzt wird sodass die zuvor mit UV-Licht aktivierte Schicht polymerisiert und sich dabei mit den kleinen Zylindern der Strukturschicht verbindet.

Eine weitere Aufgabe dieses Teilprojekts ist die Herstellung von Sensoren in der gefertigten Fluidstruktur wie beispielhaft in Abbildung 6 dargestellt. Dazu konnten analog der Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Technologie erstmals Bragg-Gitter-Strukturen mittels Femtosekundenlaser in einen Polymerwellenleiter eingeschrieben werden. Mit den Bragg-Gitter-Strukturen im Wellenleiter können minimale Brechzahl zur chemischen Analyse oder auch Temperaturunterschiede gemessen werden. Der nächste Schritt besteht in der Integration der funktionalisierten Wellenleiter in die Fluidstrukturen.

Katalytische Methanisierung (TP4)

Die katalytische CO₂-Methanisierung findet in der Regel an porösen Katalysatoren in Festbettreaktoren statt. Die Katalysatoren können dabei in ihren Eigenschaften speziell angepasst werden [1]. Aufgrund der hohen Exothermie der Reaktion bilden sich erhebliche Übertemperaturen (Hotspots) aus, welche mehr als 100 °C betragen können und sowohl den Katalysator

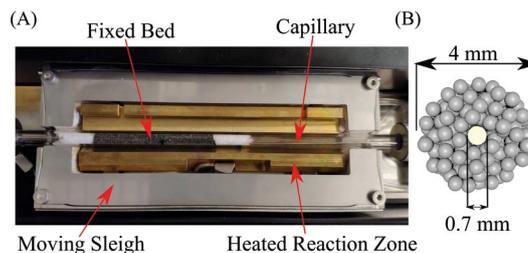


Abbildung 8: Darstellung des verwendeten Reaktors. A) Katalysatorbett auf einem verschiebbaren Träger mit Kapillare. B) Schematische Draufsicht auf das Festbett mit Dimensionen [2].

schädigen als auch die Methanausbeute reduzieren können. Im Gegensatz zu klassischen Versuchseinrichtungen, bei welchen nur im begrenzten Maße Informationen aus dem Reaktor zu gewinnen sind, ist es mit dem in Abbildung 8 dargestellten experimentellen Aufbau möglich, axiale Temperatur- und Konzentrationsverläufe zu bestimmen.

In der Mitte des Festbetts befindet sich eine dünne Kapillare. Mithilfe dieser kann sowohl ein Teilstrom der Gasmischung entnommen als auch dessen Temperatur bestimmt werden. Durch Verschieben des Schrittmotors können somit axiale Profile aufgenommen werden. In Abbildung 9 sind die gemessene Temperaturerhöhung und die dazugehörigen Umsatzverläufe dargestellt.

Nach einer Reaktorlänge von circa 15 mm können bei der höchsten betrachteten Eingangstemperatur Temperaturerhöhungen von knapp 100 °C gemessen werden. Anschließend sinkt die Temperatur wieder annähernd auf die Eingangstemperatur ab. Die Reaktionszone befindet sich somit hauptsächlich in der ersten Hälfte des Reaktors, dies kann auch dem steilen Anstieg des Umsatzes in diesem Bereich in Teil (B) der Abbildung entnommen werden. Ein vollständiger Umsatz ist aufgrund der Gleichgewichtslimitierung der Reaktion nicht möglich. Mit Hilfe der gestrichelten Linien sind in Abbildung 9 ebenfalls Vergleiche mit einem zweidimensionalen Reaktormodell möglich.



Abbildung 7: Funktionalisierter Polymerwellenleiter mit integrierter Bragg-Gitter-Sensorstruktur.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

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

Förderzeitraum:

01.01.2019–30.06.2022

Ausführende Stelle:

Technische Universität Clausthal, Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik, Institute of Subsurface Energy Systems, Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien, Institut für Mathematik, Clausthal-Zellerfeld, Niedersachsen

Fördermittelgeber:

Technische Universität Clausthal, Forschungszentrum Energiespeichertechnologien

Projektstatus:

Projekt in Bearbeitung

Projektleiter:

Prof. Dr. Leonhard Ganzer

Projektkoordinator:

Maximilian Wirth
maximilian.wirth@tu-clausthal.de

Projektpartner:

Prof. Dr. Olaf Ippisch
Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek
Prof. Dr. Wolfgang Schade
Prof. Dr.-Ing. Gregor D. Wehinger



Leonhard Ganzer



Maximilian Wirth

Mehrskalen-Simulation der katalytischen Methanisierung (TP5)

Während sehr ausgedehnte Festbetten ausreichend mit klassischen Modellen beschrieben werden, da sich lokale Effekte ausgleichen können, ist die Beschreibung von Reaktoren mit einem kleinen Reaktor-zu-Partikeldurchmesser-Verhältnis (D/d_p) schwieriger. Durch die begrenzende Wand des Reaktors ordnen sich die Partikel je nach Form und Größe in unregelmäßigen oder teils auch geordneten Strukturen.

Die lokale Bettstruktur hat jedoch immer einen maßgeblichen Einfluss auf die örtliche Durchströmung und damit auch auf den Wärme- und Stofftransport. Um solche Festbetten möglichst realitätsnah abbilden zu können, bedarf es einer dreidimensionalen Strömungssimulation (CFD), die die lokale Bettstruktur berücksichtigt. In einem ersten Schritt des Teilprojektes wurde deshalb der Einsatz einer neuen Methode zur synthetischen Festbettezeugung näher erforscht und die Struktur der erhaltenen Festbetten mit experimentellen Daten aus der Literatur verglichen [3].

Dabei hat sich gezeigt, dass der Einsatz des *Rigid Body Approach* (RBA) nicht nur schneller ist als die *Discrete Element Method* (DEM), sondern auch in Bezug auf komplexe Partikel eine geeignetere Abbildung der lokalen Struktur liefert [3, 4] (Abbildung 10A und Abbildung 10B). Gerade für die Reaktorgeometrie aus TP4 spielt dies eine wichtige Rolle, da das Festbett dort nicht nur durch die äußere Wand, sondern auch durch die Kapillare begrenzt wird, was zu einem zusätzlichen lokalen Effekt führt (siehe Abbildung 8B) [2].

Außerdem erfordert die große Anzahl an Partikeln eine leistungsfähige synthetische Festbettgenerierung. Neben der Validierung der Struktur wurden zudem eigene Experimente durchgeführt, um die Auswirkung der Struktur auf das Strömungsverhalten näher zu untersuchen und das CFD-Modell zu validieren [4]. Dabei konnte gezeigt werden, dass gerade die gängigen Druckverlustkorrelationen aufgrund der lokalen Struktur eines Festbettes den Druckverlust stark überschätzen können, während die CFD-Simulation die experimentellen Ergebnisse gut widerspiegeln kann (Abbildung 10D).

Reaktionen in den Partikeln wurden zudem implementiert [2]. Der Einfluss der Bettstruktur auf die Reaktion wird exemplarisch in Abbil-

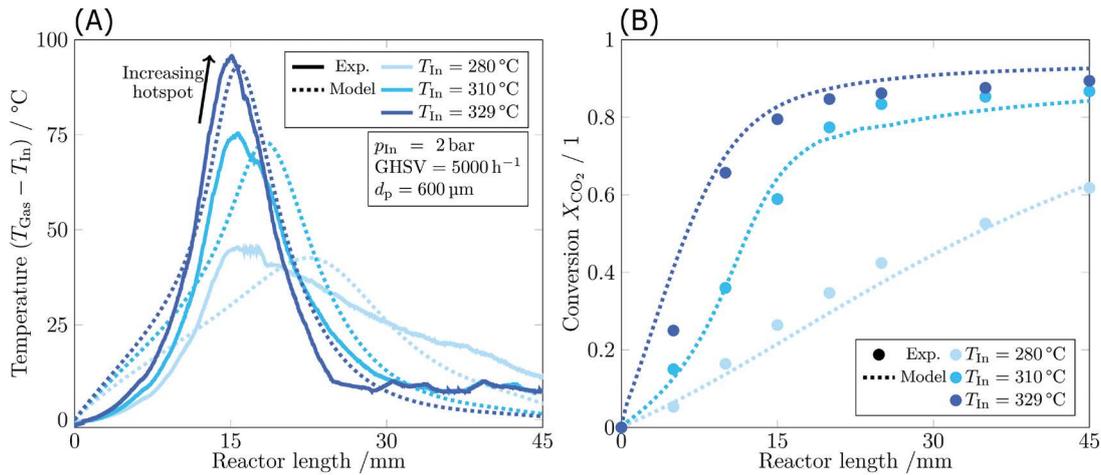


Abbildung 9: Axiale Erhöhung der Reaktortemperatur für unterschiedliche Eingangstemperaturen T_{in} (A) und entsprechende Umsatzverläufe X_{CO_2} (B). Vergleich mit 2D Modellansatz in gestrichelter Linie.

derung 10E sichtbar, wo starke radiale Konzentrationsunterschiede zu erkennen sind, welche sich im Bereich hinter dem Festbett mischen. Während die 2D-Modellierung aus TP4 bereits gute Übereinstimmung für kugelförmige Partikel zeigt, wird die Abbildung komplexerer Partikel mit solchen Ansätzen schwieriger. Für die partikel aufgelöste CFD hingegen spielt die Partikelform hingegen nur eine untergeordnete Rolle.

Referenzen

- [1] Kreitz, B., A. Martinez Arias, J. Martin, A. P. Weber und T. Turek. Spray-Dried Ni Catalysts with Tailored Properties for CO₂ Methanation. *Catalysts*, 10(12), (2020): 1410.
- [2] Fleischlen, S., J. Martin, B. Kreitz, T. Turek und G.D. Wehinger. Computational Fluid Dynamics Simulation of CO₂ Methanation in a Fixed-bed Profile Reactor. *Computer Aided Chemical Engineering*, (48), (2020): 499–504.
- [3] Fleischlen, S. und G. D. Wehinger. Synthetic packed-bed generation for CFD simulations: blender vs. STAR-CCM+. *ChemEngineering*, 3(2), (2019): 52.
- [4] Fleischlen, S., M. Kutscherauer und G. D. Wehinger. Local structure effects on pressure drop in slender fixed beds of spheres. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(1-2), (2021): 273–281.

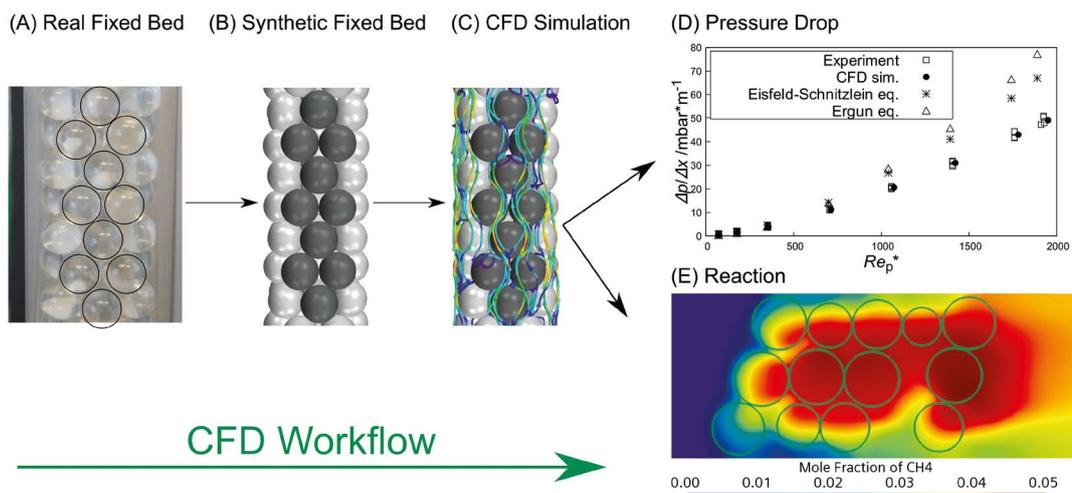


Abbildung 10: A) Struktur eines realen Festbettes, welches mithilfe von synthetischer Festbettezeugung reproduziert wurde B) Mithilfe von Experimenten kann das CFD-Modell in Bezug auf den Druckverlust (D) und die Reaktion (E) validiert werden. Abbildung modifiziert aus [4].

GridBatt: Batterietechnologien zur Sicherstellung eines sicheren Netzbetriebs

Kurzfassung

Ziel des Projekts GridBatt ist es, die besonderen Anforderungen bei der Verwendung eines Batteriespeichers zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs herauszuarbeiten, um den Speicher schon beim Entwurf an die Anforderungen anzupassen, das Speichersystem optimal zu dimensionieren sowie dessen Betriebsführung zu optimieren. Nur ein ganzheitlicher Ansatz von der Zellchemie über die Schnittstelle zum System, den Systemanforderungen und den jeweiligen Rückkopplungen ermöglicht es, das volle Potential von Batteriespeichern auszuschöpfen. Ein Abgleich der besonderen Anforderungen, die typischerweise eine hohe Leistung bei kleinem Energiedurchsatz und hoher Fluktuation erfordern, mit den aktuell genutzten Speichertechnologien zeigt, dass ein Defizit technischer Lösungen besteht. Das EST hat zum Ziel, ausgehend von den dynamischen Anforderungen im elektrischen Netz mit der Charakterisierung verschiedener Leistungsspeicher einen Benchmark zum Stand der Technik zu erstellen. Die Untersuchungen erfolgen auf Zellebene, werden aber abgeleitet aus den Systemanforderungen im Netz. Ein weiteres Ziel ist daher die Formulierung von Übertragungsfunktionen zwischen Netz und Batterie über den Umrichter. Um insbesondere das Potential von Aluminium-Ionen-Batterien (AIB) für hohe dynamische Anforderungen zu evaluieren, werden diese im Projekt elektrochemisch charakterisiert und Modelle zur Beschreibung des (dynamischen) Strom-Spannungs-Verhaltens erstellt. Auf Basis des entwickelten Zellmodells erfolgt ein Hochskalieren auf Systemebene, um

in der Gesamtsimulation das Verhalten eines AIB-Speichers am Netz zu beurteilen.

Summary

The aim of the GridBatt project is to work out the special requirements when using a battery storage system to ensure stable grid operation, in order to adapt the storage system to the requirements already at the design stage, to optimally dimension it and to optimise its operation strategy. Only a holistic view of the cell chemistry, the interface to the system, the system requirements and the respective feedbacks makes it possible to exploit the full potential of battery storage systems. A comparison of the particular requirements, which typically demand high power rate with low energy throughput and high fluctuation, with storage technologies currently in use shows that there is a deficit of technical solutions. The EST aims to establish the state of the art by characterising different power storage systems based on the dynamic requirements in the electrical grid. The examinations are carried out in cell level, but are derived from the system requirements of the grid. A further goal is therefore the formulation of transfer functions between the grid and the battery via the converter.

In order to evaluate the potential of Aluminium-ion-batteries (AIB) for high dynamic requirements, they are electrochemically characterized in the project and models are created to describe the dynamical current-voltage behaviour. On the basis of the developed cell model, an upscaling to system level is carried out in order to evaluate the behaviour of an AIB storage unit on the grid in the overall simulation.

Projektpartner:

- Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB), Technologiezentrum Hochleistungsmaterialien (THM)
- Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)

Motivation

Aufgrund hoher Dynamik und Wirkungsgraden sowie geringen Ruheverlusten sind Batteriespeicher technisch dazu prädestiniert, die Versorgungssicherheit und -qualität der elektrischen Netze in unterschiedlichen Anwendungen zu unterstützen [1]. Mit bereits heute erreichbaren spezifischen Energie- und Leistungsdichten sowie hohen Lebensdauern und Zyklenzahlen zu immer wirtschaftlicheren Betriebs- und Investiti-

onskosten sind Batteriespeicher zur Erbringung von Systemdienstleistungen wie Frequenz- und Spannungshaltung, Betriebsführung und Versorgungswiederaufbau aber auch Eigenverbrauchsoptimierung und Energievermarktung am Spotmarkt [1,2] gut geeignet. Aktuell werden Batteriespeicher in den elektrischen Netzen hauptsächlich zur Erbringung von Primärregelleistung, im privaten Bereich als PV-Speicherkombination oder zur Notstromversorgung eingesetzt. Vor dem Hintergrund abnehmender rotierender Massen im elektrischen Netz durch das Abschalten konventioneller Kraftwerke müssen darüber hinaus mittelfristig Alternativen zur Bereitstellung der Momentanreserve geschaffen werden, für die Batteriespeicher grundsätzlich in Frage kommen [3–6].

Zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes mithilfe elektrischer Speichersysteme – hier im Speziellen Batteriespeicher – ist es essentiell, die anwendungsspezifischen Anforderungen eindeutig zu formulieren, um den Speicher schon beim Entwurf (Auswahl Zellchemie, Technologie, Geometrie, Umgebungsbedingungen, etc.) an diese anzupassen, optimal zu dimensionieren und auszulegen sowie dessen Betriebsführung zu optimieren. Nur eine ganzheitliche Betrachtung von der Zellchemie über die Schnittstelle (üblicherweise der Umrichter) zum System, den Systemanforderungen und den jeweiligen Rückkopplungen ermöglicht es, das volle Potential von Batterien auszuschöpfen.

Dabei ist maßgeblich zu berücksichtigen, dass die elektrischen Belastungen in vielen Sys-

temen hoch dynamisch sind und neben der Gleichstrom- häufig eine Wechselstrom- bzw. Mischstromkomponente umfassen [7]. Im Rahmen des Vorhabens GridBatt soll daher gezeigt werden, dass für hohe dynamische Netzanforderungen – z.B. die Momentanreserve und schnelle Spannungs- und Frequenzregelung betreffend – eine technologische Lücke sowohl aus Netzsicht als auch aus den erforderlichen Speichereigenschaften vorliegt, die u.a. aus ökopolitischen Gründen sehr zeitnah geschlossen werden muss.

Ansatz

Werden Energiespeicher mit einer im Vergleich zum Energieinhalt hohen oder sehr hohen Leistung benötigt, bestehen oftmals Unklarheiten bzgl. der Auslegung und Dimensionierung des Speichersystems, da Zielkonflikte bestehen. Idealerweise stellt ein Speicher über einen möglichst großen Zeit- (μs bis Stunden) bzw. Frequenzbereich (mHz bis kHz) eine hohe Leistung zur Verfügung.

Klassischerweise dominieren den dynamischen Frequenzbereich Kondensatoren, Doppelschichtkondensatoren (DSK) und Schwungmassenspeicher (SMS). Immer leistungsfähigere Lithium-Ionen-Batterien haben aber den Einsatzbereich elektrochemischer Speicher stark aufgeweitet, sodass sie bereits heute oftmals in Konkurrenz treten können. Es gibt jedoch immer noch Anwendungen, in denen Kondensatoren, DSK, SMS eine zu geringe Ener-

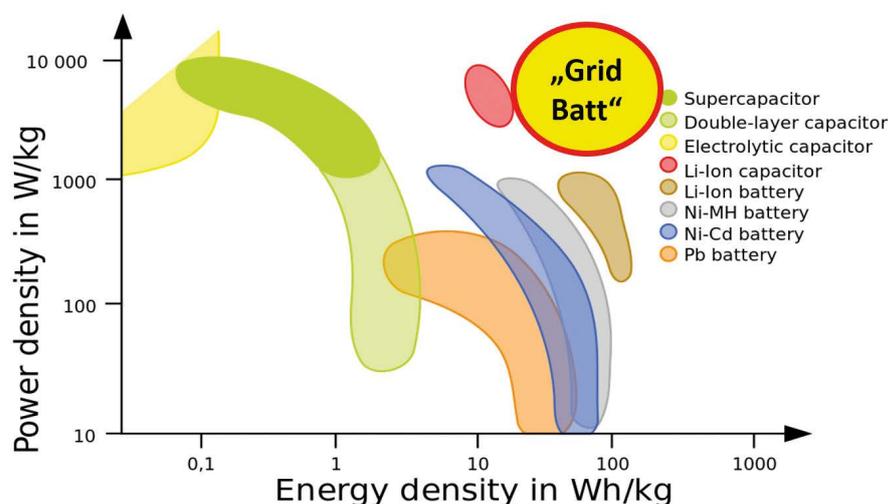


Abbildung 1: Prinzipielle Einordnung des dynamischen Netzspeichers „GridBatt“ im Ragone-Diagramm (nach [8]).

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

GridBatt: Batterietechnologien zur Sicherstellung eines sicheren Netzbetriebs

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen:

03XP0307

Projektlaufzeit:

01.10.2020–30.09.2023

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

Projektkoordinator:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

Projektbearbeiter:

Dipl.-Ing. Frank Deblon
Jacob Klink, M.Sc.



Ralf Bengler



Frank Deblon



Jacob Klink

giedichte (spezifisch bezogen auf Masse oder Kosten) aufweisen, Batterien aufgrund zu kleiner Leistungsdichten diese Anforderungen aber ebenso wenig erfüllen können. So zeigte sich beispielsweise im EST-Projekt „ReserveBatt“ [5,6], dass ein Speicher zur Erbringung von Momentanreserve ein Leistungs-zu-Energieverhältnis von 200/1 h⁻¹ (400kW/2kWh) haben sollte, wenn das System (leistungsbezogen) ideal auslegt ist. Hierfür fehlt der „ideale“ Speicher (siehe Abbildung 1).

Vielversprechend für Speicher zur Netzstabilisierung mit sehr hohen Leistungs-zu-Energieverhältnissen sind Ansätze mit Aluminium-Ionen-Batterien (AIB) mit Aluminium und Graphit als Elektrodenmaterial, für die Laderaten von 100C und eine Zyklenstabilitäten von 500.000 Zyklen gezeigt werden konnten [9]. Inwieweit AIB den Anforderungen genügen, wird im Projekt ausgehend von den Materialeigenschaften bis hin zur Systemebene untersucht. Bisher finden die Anforderungen an den Speicher aus der Anwendung nur unzureichend Berücksichtigung in der Material- und Zellentwicklung (Top-Down) oder umgekehrt (Bottom-Up); damit existieren kein Optimum und keine anwendungsfall-spezifische Auslegung und Betriebsführung z.B. unter Berücksichtigung von Alterungseffekten, von Umrichterwirkungsgraden in Teillast oder von der Abhängigkeit der verfügbaren Kapazität vom Entladestrom.

In GridBatt wird deshalb versucht, über einen möglichst systemischen Ansatz und die skalenübergreifenden Betrachtung von den Anforderungen aus der Anwendung (Netz) über die Systemschnittstelle (Wechselrichter) zur Speichertechnologie und deren Rückkopplung einen optimalen Speicher für dynamische (Netz-)Anwendungen zu finden. So können in einer ganzheitlichen Simulation die Auswirkungen von Parameteränderungen (z.B. Spannungsantwort in Abhängigkeit der Batterieperformance bei geänderter Auslegung des Umrichters) direkt erkannt werden.

Projektkonsortium und Einordnung im Cluster Batterienutzungskonzepte des BMBF

Gemeinsam mit den Forschenden des Technologiezentrums für Hochleistungsmaterialien (THM) Freiberg des Fraunhofer Instituts für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologien (IISB) soll im GridBatt-Projekt ein Demonstrator einer Aluminium-Ionen-Batterie auf Stackebene



Abbildung 2: Cluster-Logo von GridBatt im Rahmen der Batterienutzungskonzepte.

aufgebaut werden, der ein späteres Hochskalieren bis auf die Systemebene ermöglicht. Wie die verschiedenen Anforderungen von der Netzseite zu bewerten sind und wie sie auf das Speichersystem übertragen werden können, wird im Projekt von Forscherinnen und Forschern der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit den dortigen Lehrstühlen für Leistungselektronik und Elektrische Netze und Erneuerbare Energie vom Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY) untersucht.

Unter der Koordination durch das EST ist das Vorhaben als eines der ersten Projekte im Cluster „Batterienutzungskonzepte“ (BattNutzung) im Oktober 2020 offiziell gestartet und hat eine Laufzeit von insgesamt drei Jahren. Der Kompetenzcluster ist Teil des Dachkonzepts des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Batterieforschung. Die Mission des Clusters besteht in der Entwicklung, Gestaltung und Anwendung neuer Konzepte zur Batteriesystembewertung, welche experimentelle Ergebnisse und Erkenntnisse auf Zellebene über ein Systemverständnis mit der Ebene batterietechnischer Anforderung verbindet.

In den 16 Forschungsprojekten des BattNutzung-Clusters arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus insgesamt 29 Instituten deutscher Universitäten und Forschungseinrichtungen gemeinsam an der Erforschung neuer Konzepte zur Batteriesystembewertung. Durch stetige Kommunikation zwischen den Forschungsprojekten und mit dem aus Industrie und Wissenschaft besetzten Managementkreis des Clusters wird in enger Abstimmung mit dem BMBF und dem KLiB ein enges Netzwerk von Wissenschaft und Industrie geschaffen (<https://www.battnutzung-cluster.de/de/>).

Ziele

Das EST hat zum Ziel, ausgehend von den Anforderungen an Speicher im elektrischen

Netz mit der Charakterisierung aktuell eingesetzter (elektrischer und elektrochemischer) Leistungsspeicher bzgl. ihrer dynamischen Eigenschaften einen Benchmark zum Stand der Technik zu erstellen. Die Untersuchungen erfolgen auf Zellebene, werden aber abgeleitet aus den Anforderungen aus dem Netz, welche vom Magdeburger IESY erarbeitet werden. Darüber hinaus verfügt das EST mit verschiedenen Batterie-Umrichtersystemen über die notwendige Infrastruktur, verschiedene Netzsituationen nachzustellen und die Rückwirkungen auf den Gleichspannungs-Zwischenkreis zu messen und auszuwerten. Ein Teilziel ist daher die Erstellung der Übertragungsfunktion zwischen Netz und Batterie über den Umrichter (siehe auch Abbildung 4).

Um das Potential von Aluminium-Ionen-Batterien für hohe dynamische Anforderungen zu evaluieren, werden diese entsprechend untersucht und charakterisiert, ihre elektrochemischen Eigenschaften ermittelt und hiermit Modelle zur Beschreibung des (dynamischen) Strom-Spannungsverhaltens erstellt. Auf Basis des entwickelten Zellmodells erfolgt ein Hochskalieren auf Systemebene, um in der Gesamtsimulation das Verhalten des Aluminium-Ionen-Speichers am Netz zu beurteilen.

Arbeitspakete und Projektstand

Das Gesamtprojekt ist in drei Teilprojekte der drei kooperierenden Einrichtungen aufgeteilt, siehe Abbildung 3. Die Arbeitspakete kann man entweder als Top-Down-Ansatz von den Anforderungen aus dem Netz auf den Speicher und von dort weiter auf die Material- und Zellentwicklung betrachten oder als Bottom-Up, also von den Materialeigenschaften auf das elektrochemische Systemverhalten und von dort auf das Verhalten am Netz.

Im Arbeitspaket 1 analysieren die Forscherinnen und Forscher aus Magdeburg die Anforderungen, die sich für einen Speicher für die dynamische Netzstabilisierung ergeben und erstellen ein dynamisches Netzmodell. Darüber hinaus wird zur Kopplung zwischen Speicher und Netz der leistungselektronische Umrichter nachgebildet. Abbildung 4 zeigt das prinzipielle Zusammenwirken von Batterie, Leistungselektronik und Netz.

In Arbeitspaket 3, für welches das IISB hauptverantwortlich ist, wird zunächst eine Analyse bestehender und zukünftiger Material-, Zell-

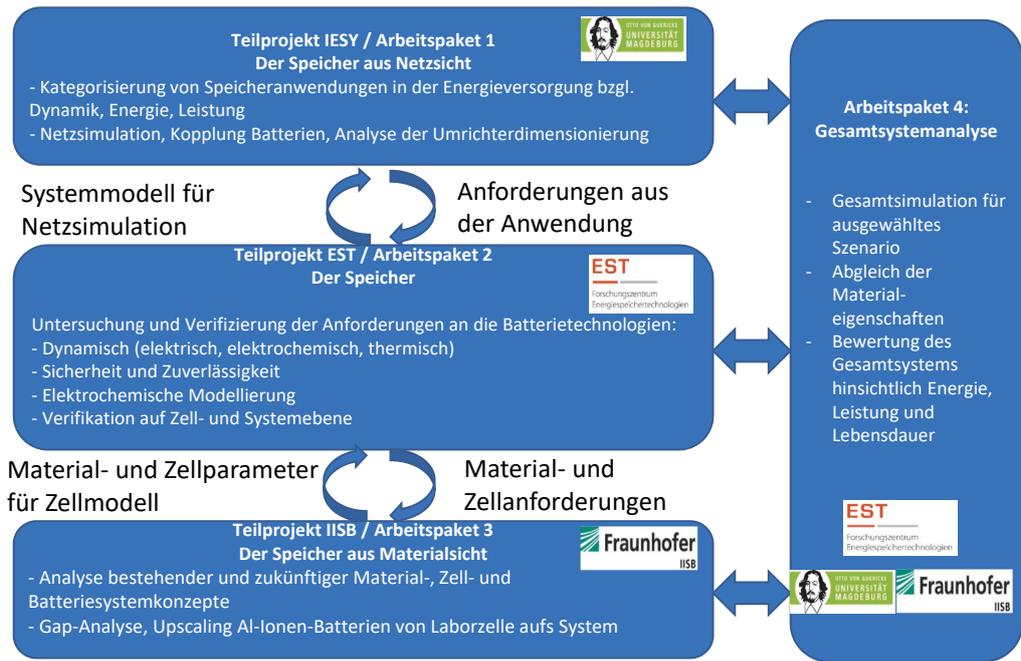


Abbildung 3: Projektstruktur mit den Teilprojekten Netz (IESY), Speicher (EST) und Zelle (IISB). Das Arbeitspaket 4 bildet mit der Gesamtsimulation die Klammer um die Teilprojekte.

und Batteriesystemkonzepte durchgeführt und die Lücke zwischen Energie- und Leistungsspeichern identifiziert („Gap-Analyse“).

Dynamische Batteriemodellierung und Charakterisierung

Für die Betrachtung der Auswirkungen des Batterieverhaltens auf das Gesamtsystem (siehe Abbildung 4) ist ein Batteriemodell zu erstellen, welches das dynamische Verhalten korrekt wiedergibt (Arbeitspaket 2 des EST). Hierbei sind bestehende Modellvorstellungen zu erweitern, um das elektrochemische und elektrophysikalische Verhalten in Grenzbereichen abzubilden.

Da Datenblattangaben typischerweise das hochdynamische Verhalten nicht abbilden können, sind für verschiedene Technologien Messmethoden zur Überprüfung der netzstabilisierenden Wirkung einzuführen.

Es gilt zu prüfen, wie weit die Grenzstrombelastungen in Bezug auf das thermische, elektrochemische und elektrische Verhalten ausgereizt werden können, ohne die Batterie zu stark zu beschädigen. Aus der Literatur sind hierzu verschiedene theoretische [11, 14] und experimentelle Ansätze bekannt [10–13, 15], die sich jedoch ausschließlich mit hohen Entladeraten und auf Laborzellenebene beschäftigen. Die Übertragbarkeit auf die Laderichtung

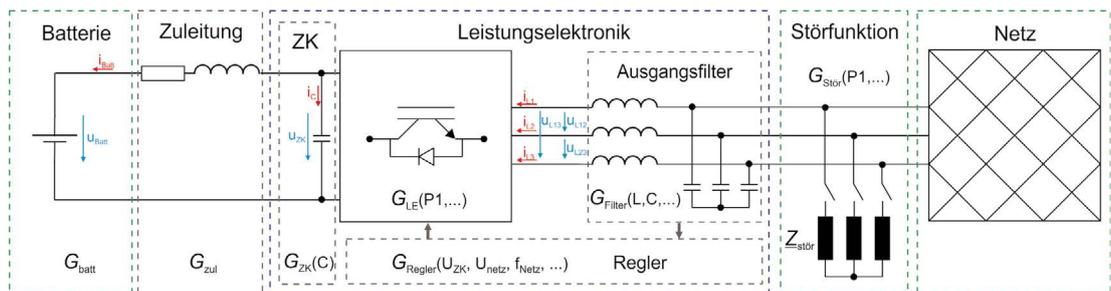


Abbildung 4: Prinzipdarstellung des Batterie-Umrichtersystems zur Netzstützung zur Untersuchung der Auswirkungen eines Ereignisses auf der Netzseite (Störfunktion) auf das Gesamtsystem. Die einzelnen Übertragungsfunktionen G_i werden in den Teilprojekten entsprechend modelliert und in die Gesamtsimulation implementiert.

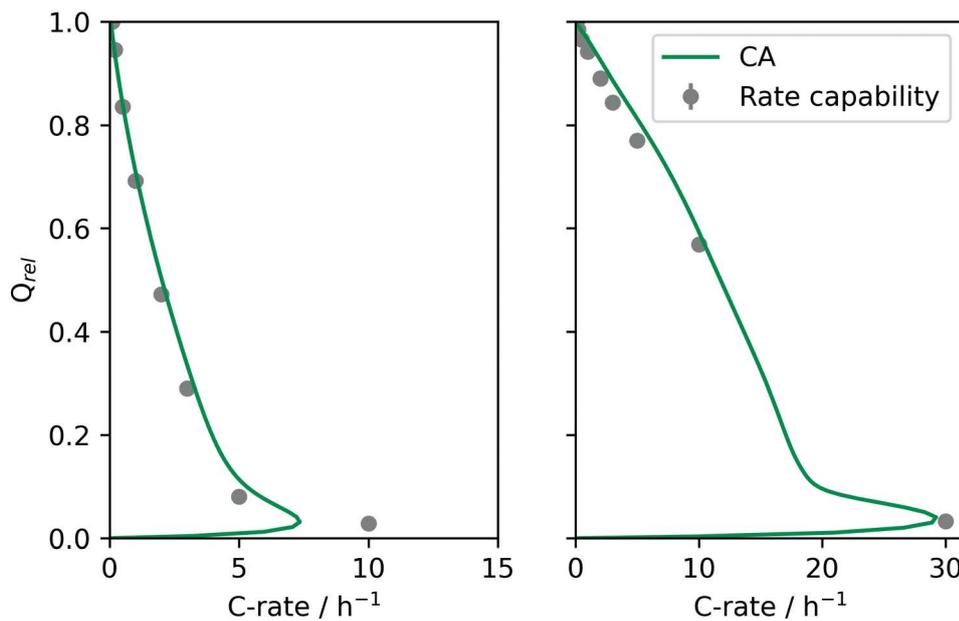


Abbildung 5: Chronoamperometrie einer Lithium-Ionen-Zelle (Pouch NMC/C, 5Ah) bei einem Spannungssprung von 0,25V (links) und 0,75V (rechts) und die dazugehörigen Kapazitäten Q_{rel} (bezogen auf die Kapazität bei 0,1C und 0,25V bzw. 0,75V Spannungsdifferenz) bei verschiedenen Konstant-Entladeraten. Die C-Rate ist dabei der auf die Nennkapazität bezogene Strom.

und auf industriell relevante Zellgrößen wird mithilfe von Konstantstrombelastungen (sog. Rate Capability Tests) und Spannungssprüngen (Chronoamperometry) derzeit überprüft (siehe Abbildung 5). Zur weiteren Charakterisierung werden Impedanzmessungen und Strompulsmessungen durchgeführt. Ein Ziel der Untersu-

chungen ist die Entwicklung und Validierung einer schnellen und allgemein anwendbaren Parametrisierungsmethode für Hochleistungsanwendungen. Dazu werden zurzeit Messungen an verschiedenen Lithium-Ionen- und ersten Aluminium-Ionen-Batterien, die vom IISB hergestellt wurden, durchgeführt. Wie Abbil-

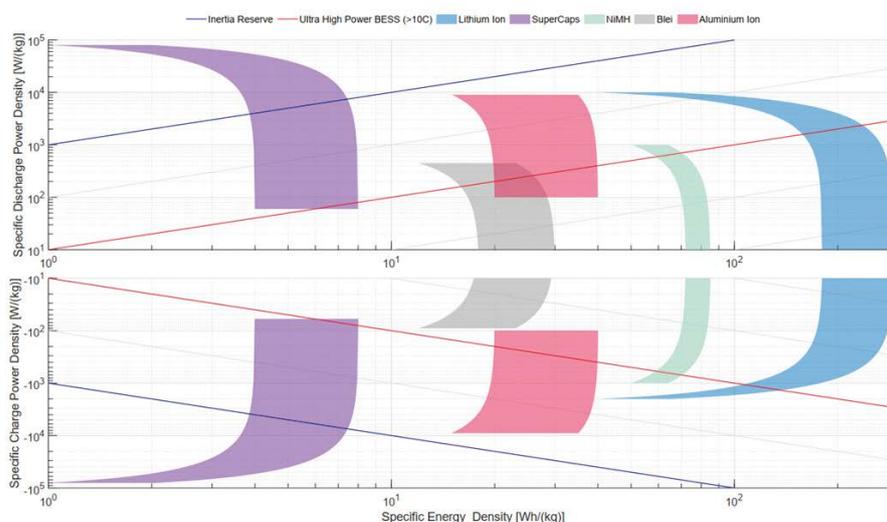


Abbildung 6: Erweitertes Ragone-Diagramm zur Einordnung relevanter elektrochemischer Speichertechnologien bzgl. spezifischer Leistung- und Energiedichte. Im Gegensatz zu üblichen Darstellungen ist im unteren Diagramm die Laderichtung abgebildet, da diese typischerweise für viele Technologie begrenzt wird. Für AIB (rote Fläche) sind diese Beschränkungen in Laderichtung nicht gegeben. Für pulsformige Belastungen wird erwartet, dass die Anforderungen zur Erbringung von Momentanreserve (blaue Gerade) erfüllt werden können.

dung 5 zeigt, ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Chronoamperometrie und den Konstantstromentladungen erkennbar. Bei der Ermittlung der stromratenabhängigen Kapazität ist durch Anwendung der CA eine deutliche Versuchsverkürzung erreichbar, da quasi alle Raten in der Kurve enthalten sind.

Vergleich von Speichertechnologien

In Zusammenarbeit mit dem IISB ist vom EST ein erweitertes Ragone-Diagramm entwickelt worden, siehe Abbildung 6, welches auf einer breiten Datenbasis fußt und vor allem um die Laderichtung erweitert wurde, da diese typischerweise für viele Technologie begrenzt ist. Da die Darstellung im Ragone-Diagramm von vollständigen Lade- und Entladezyklen ausgeht und keine Aussagen zur (zeitabhängigen) Pulsbelastbarkeit macht, werden derzeit weitere Darstellungsformen entwickelt, die insbesondere den Hochleistungsbereich adressieren.

Literatur

- [1] Schriftenreihe des EFZN, Band 13: Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit", 2013 – ISBN 978-3-95404-439-9.
- [2] Hesse, H. et al.: Lithium-Ion Battery Storage for the Grid – A Review of Stationary Battery Storage Systems Tailored for Applications in modern Power Grids, *Energies*, 10, 2017.
- [3] Gollenstede, Beushausen, Bengner, Beck, Schael, Kruschel, Ulbrich und Schmies: Design of a High-Performance Battery Converter System for Providing Synthetic Inertia at Distribution Network Level, 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), 2018.
- [4] Beushausen, L., R. Bengner, J. Gollenstede, B. Werther und H.-P. Beck: Dynamic requirements on LFP batteries used for providing Virtual inertia, in NEIS Conference 2016 "Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern", Schulz, Detlef (Hrsg.) – ISBN 978-3-658-15029-7, Hamburg 2016.
- [5] BMWI: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/innovation-durch-forschung-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=17, Seite 76, 2018.
- [6] Deblon, Beck, Bengner, Kruschel, Reineke, Schael, Turschner und Werther: Implementation and evaluation of a high-performance battery converter system for providing synthetic inertia at distribution network level, 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), 2021.
- [7] Bengner, R.: Dynamik von umrichter gespeisten Energiespeichersystemen, Dissertation TU Clausthal, ISBN 978-3-95404-371-2, 2013.
- [8] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiespeicher3.svg>.
- [9] Elia et al.: An Aluminum/Graphite Battery with Ultra-High Rate Capability, *Batteries Supercaps* vol. 2, 2019.
- [10] Heubner et al.: Comparison of chronoamperometric response and rate-performance of porous insertion electrodes: Towards an accelerated rate capability test, *Journal of Power Sources*, 397, 2018.
- [11] Tian et al.: Quantifying the factors limiting rate performance in battery electrodes, *Nature Communications*, 2019.
- [12] Heubner et al.: Diffusion-Limited C-Rate: A Fundamental Principle Quantifying the Intrinsic Limits of Li-Ion Batteries, *Adv. Energy Materials*, 10, 2020.
- [13] Tian et al.: Using chronoamperometry to rapidly measure and quantitatively analyse rate-performance in battery electrodes, *Journal of Power Sources*, 468, 2020.
- [14] Lain, Kendrick: Understanding the limitations of lithium ion batteries at high rates, *Journal of Power Sources* 493, 2021.
- [15] Bridgewater et al.: A Comparison of Lithium-Ion Cell Performance across Three Different Cell Formats, *Batteries* 7,38, 2021.

RiskBatt: Risikoanalyse für lithiumbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase

Kurzfassung

Bei Lithium-Ionen-Batterien können aufgrund verschiedenster Fehlerfälle sicherheitskritische Zustände auftreten. Aus diesem Grund müssen zur Zulassung und Zertifizierung eine Vielzahl von verschiedenen Sicherheitstests durchgeführt werden, welche in Normen definiert sind [1]. Es ist jedoch bekannt, bezüglich der aktuellen Testvorschriften ein Parameterspielraum für die Testdurchführung möglich ist, welcher das Testergebnis signifikant beeinflusst. So sollen im Projekt RiskBatt, sowohl einzelne Zellen als auch zum Modul verschaltete Zellen gezielt bei sogenannten „Abuse-Tests“ in einen sicherheitskritischen Zustand gebracht und die Charakteristik der Fehlerfälle mit umfangreicher Messtechnik aufgezeichnet und analysiert werden. Durch die Nutzung der in den Normen definierten Auslösemechanismen (Triggern) und neuartigen Methoden sollen neue Vorschläge zur Harmonisierung der derzeitigen Normen erarbeitet werden. Die Ergebnisse, insbesondere die Messdaten der Gasanalyse, werden in einer Datenbank abgelegt und sowohl zur Ableitung von konstruktive Maßnahmen für neue, sicherere Batterieanwendungen, die Schadensrisikobewertung, als auch die Erhöhung des Personenschutzes bei Batteriebränden herangezogen.

Summary

Safety-critical conditions can occur in lithium-ion batteries due to a wide variety of faults. For this reason, a large number of different safety tests must be performed for certification and approval, which are defined in a wide variety of standards [1]. However, it is known that the existing tests allow a parameter tolerance for the test procedure, which significantly influences the test result. Thus, in the RiskBatt project, both single cells and cells connected to form a module are to be systematically driven to a

safety-critical state in so-called "Abuse Tests", while the characteristics of these cells will be recorded and analyzed using extensive measurement technology. By using the triggering mechanisms (triggers) defined in the standards and novel methods, new proposals for harmonizing the present standards will be developed. The results, in particular the measurement data of the gas analysis, will be stored in a database and used for constructive measures for new, safer battery applications, damage risk assessment and increasing personal protection during battery fires.

Motivation

Lithium-Ionen-Batterien stellen derzeit für eine Vielzahl von Anwendungen, wie z. B. Mobiltelefone, Power-Tools oder Elektrofahrzeuge auch mittelfristig einen konkurrenzlosen Energiespeicher dar. Aus der Verwendung von Lithium resultiert eine gewünscht hohe Energiedichte, aber auch, aufgrund der hohen Reaktivität des Lithiums, ein potentiell gefährliches Zellsystem. Insbesondere im Schadensfall, z. B. durch

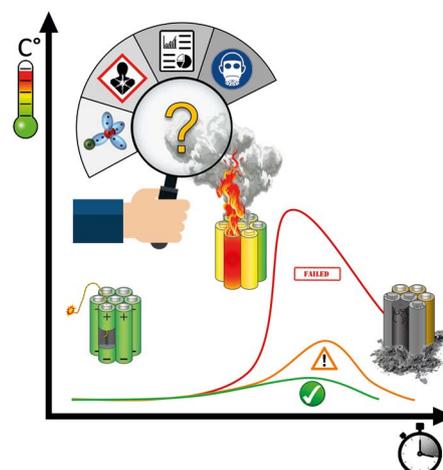


Abbildung 1: Projekt-Logo.

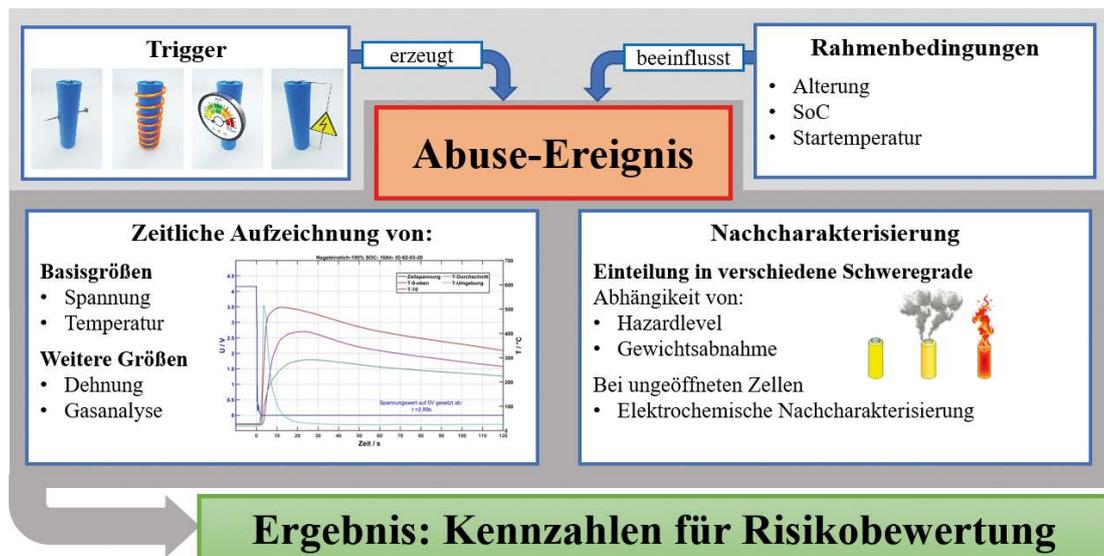


Abbildung 2: Schema zur Definition verschiedener Kennzahlen aus dem Abuse-Ereignis als Grundlage für die Risikobewertung.

mechanische Beschädigung oder dem Betrieb außerhalb der Betriebsgrenzen, kommt es in der Praxis immer wieder zu sicherheitskritischen Zuständen und damit einhergehenden Gefährdung für Mensch und Umwelt [2]. Im schlimmsten Fall eines thermischen Durchgehens, also eines sogenannten Thermal Runaways, werden große Wärmemengen und z.T. giftige Substanzen schlagartig freigesetzt [3]. Zur Entwicklung von präventiven Maßnahmen, frühzeitigen Detektionsmöglichkeiten und geeigneter Schutzausrüstung für Rettungskräfte müssen möglichst viele Informationen zur Entstehung, Entwicklung und Ausprägung von sicherheitskritischen Zuständen an Lithium-Ionen-Batterien bekannt sein. Als Grundlage hierfür werden im Projekt RiskBatt die Ergebnisse der Abuse-Tests in einer Datenbank abgelegt.

Ansatz und Ziele

Neben den verschiedenen Triggermechanismen (mechanisch, thermisch, elektrisch) zum Auslösen von Fehlerzuständen in Lithium-Ionen-Batterien hat auch der Zustand der Zelle selbst (z.B. Ladezustand, Starttemperatur, Alterungszustand) einen signifikanten Einfluss auf das Zellverhalten [4]. Des Weiteren gibt es aufgrund variierender Bauformen und Zellchemien viele unterschiedliche Zelltypen, die sich in ihren Sicherheitseigenschaften unterscheiden. Für einen umfassenden Überblick sollen im Projekt RiskBatt insgesamt über 200 Abuse-Tests durchgeführt. Ein Teil dieser Zellen wird zuvor bei verschiedenen Bedingungen zyklisch belastet, um den Einfluss unterschiedlicher Alterungsprozesse auf den Sicherheitszustand zu charakterisieren. Die Versuchsdefinition, die Durchführung der Alterungstests sowie die elektrochemische und thermische Charakterisierung des Abuse-Ereignisses werden vom EST durchgeführt. Sofern es während des Abuse-Ereignisses nicht zum Bersten der Zelle kommt, sollen einige Zellen vom EST elektrochemisch nachcharakterisiert werden, um den Sicherheitszustand von ungeöffneten Zellen besser bestimmen zu können. Sowohl die zeitlich während des Abuse-Ereignis aufgezeichneten Messgrößen, als auch die Nachcharakterisierung werden vom EST zur Definition verschiedener Kennzahlen (Abbildung 2) für eine Risikobewertung herangezogen. Der Versuchsaufbau und die Gasmessung mittels FTIR und FID werden vom CUTEC betreut. Auf Basis der detektierten Gase wird vom CUTEC eine Bewertung der chemischen Risiken durchgeführt. Das HHI

Projektpartner:

- TU Clausthal (EST und CUTEC)
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Faseroptische Sensorsysteme (HHI-FS)
- AKASOL AG
- Assoziiert:
- Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) / Fachbereich Feuerwehren, Hilfeleistungen, Brandschutz (FB FHB) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)
- Stöbich technology GmbH

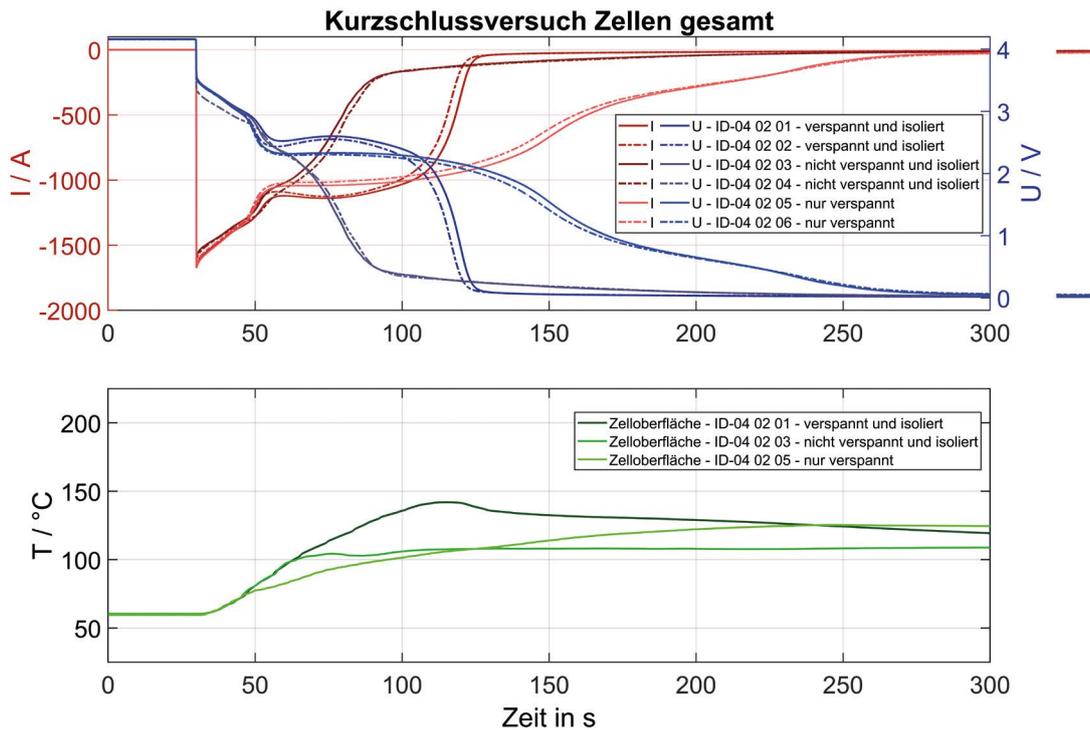


Abbildung 3: Externer Kurzschluss von 53 Ah-Kokam-Pouch-Zellen nach der Norm UN 38.3 mit verschiedenen „thermischen“ Konfigurationen.

stattet einige Zellen zur Dehnungsmessung mit faseroptischer Sensorik aus und nutzt die in der Datenbank hinterlegten Abuse-Ergebnisse zum Aufbau eines Systems zur Havarievorhersage.

höchste Zelltemperatur während des externen Kurzschlusses erreicht und somit als Worst-Case-Szenario herangezogen werden kann. Der auffällige Abfall des Kurzschlussstroms bei dieser Zelle (verspannt und isoliert) nach

Projektstand

Als Ergebnis einer Recherche zu den in den aktuellen Normen definierten Testparametern wurde der Parameterspielraum für die Durchführung verschiedener Abuse-Tests ausgearbeitet. Hierbei stellte sich unter anderem heraus, dass in vielen Normen keine Angaben zu dem Verspankonzept der Zellen gegeben sind. Aus diesem Grund wurden in der ersten Versuchsreihe jeweils zwei 53Ah-NMC-Kokam Pouchzellen in den folgenden Konfigurationen extern kurzgeschlossen.

- verspannt und isoliert
- nicht verspannt und isoliert
- nur verspannt

Aus den Versuchsergebnissen in Abbildung 3 wird ersichtlich, dass die Versuchsergebnisse des externen Kurzschlusses reproduzierbar sind. Es ist zu entnehmen, dass erwartungsgemäß die isolierte und verspannte Zelle die



Abbildung 4: Messhaube mit Anpassungen an der Luftführung. Hier dargestelltes Setup für Nagelpenetration.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wissenschaft und Energie

Förderkennzeichen:

03EI3010A

Projektlaufzeit:

01.04.2020–31.03.2023

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

Projektbearbeiter:

Jens Grabow, M.Sc. (Projektkoordinator)
Nury Orazov, M.Sc.



Ralf Bengler



Jens Grabow



Nury Orazov

dem Erreichen der maximalen Temperatur von etwa 140°C ist durch die Porenverschließung des Separators zu erklären und ein Indiz für das erhöhte Sicherheitsrisiko dieser Zellen. Zur Erzeugung von untereinander vergleichbaren Ergebnissen wurde festgelegt, dass alle weiteren Abuse-Tests in der verspannten und isolierten Konfiguration getestet werden.

Als Testumgebung wurde eine Messhaube konstruiert, welche es ermöglicht, die emittierten Gase beim Abuse aufzufangen und im Brandofen implementiert (Abbildung 4). Die Gase werden hierbei in der Messstrecke zur Analyse abgegriffen. Das Schauglas ermöglicht eine Videoaufnahme während der Versuchsdurchführung. Mit diesem Setup konnten bereits verschiedene Zellen unter Einfluss unterschiedlicher Trigger getestet werden. In einer Testreihe wurden sechs 10Ah-NMC-Kokam-Pouch-Zellen mit einem 3 mm dicken Edelstahl Nagel, in Anlehnung an die Norm SAE J2464 [1, 5] penetriert.

Die Nagelpenetration verursacht durch den erzeugten internen Kurzschluss einen abrupten Spannungsabfall, welcher in Abbildung 5 erkennbar ist. Der Spannungsabfall setzt lokal eine hohe Menge an joulescher Wärme frei, wodurch exotherme Nebenreaktionen gestartet werden. Beim diesem Abuse-Ereignis kommt es zur massiven Gasfreisetzung, jedoch zu keiner Entzündung der Havariegase. Insgesamt hat die Zelle nach dem Abuse ca 36 % (78 g) an Gewicht verloren.

Da die herkömmliche, in den Normen definierte Nagelpenetration für die geringe Reproduzierbarkeit bekannt ist und praxisnahe Fehlerfälle nur in geringem Maße nachbildet [4], entwickelt das EST eine neuartige Messapparatur mit lokal aufgelöster Temperaturmesstechnik. Durch die hochgenaue Penetration soll ein lokaler und einlagiger Kurzschluss erzeugt werden, welcher den praxisnahen internen Kurzschlussfall geeigneter nachbildet.

Literatur

- [1] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. van den Bossche und L. Boon-Brett: „A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1427–1452, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.195.

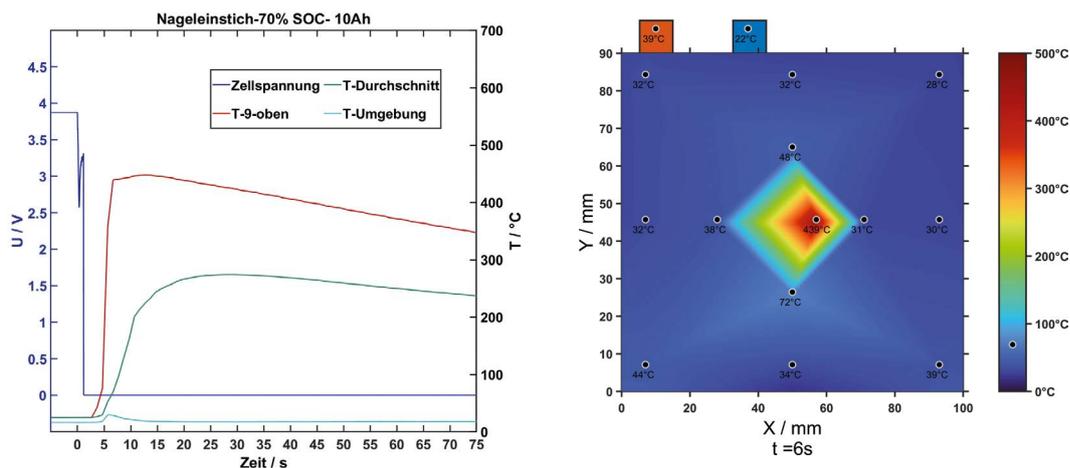


Abbildung 5: Abuse-Ergebnisse einer Nagelpenetration mit einem 3 mm Edelstahl Nagel. Links: zeitlicher Spannungs- und Temperaturverlauf nach der Penetration. Rechts: Nachgebildetes Temperaturfeld der Zelle 8 Sekunden nach der Penetration.

- [2] Tübke, Jens et al.: „12 Li-Secondary Battery“ in *Electrochemical power sources, Li-battery safety*, J. Garche und K. Brandt, Hg., San Diego: Elsevier, 2019, 507–629, doi: 10.1016/B978-0-444-63777-2.00012-8.
- [3] Diaz, F., Y. Wang, R. Weyhe und B. Friedrich: „Gas generation measurement and evaluation during mechanical processing and thermal treatment of spent Li-ion batteries“ (eng), *Waste management* (New York, N.Y.), 84, 102–111, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.11.029.
- [4] Pfrang, Andreas: „JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation“, Petten, Netherlands, 8. März 2018.
- [5] Hartmut, P.: „Safety or abuse tests in standards on Li-ion batteries – detailed description: Detailed“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.batterystandards.info/sites/batterystandards.info/files/safety_tests_detailed.pdf. Zugriff am: 13. Mai 2020.

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. Mithilfe dieser 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.

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

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 1000-jährige 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 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) Systemdienst-

leistungen 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

Ziel des Projektes ist die Erforschung eines Möglichkeitsraumes für Lösungsvarianten, um den Auswirkungen des Klimawandels im Harz und den sich daraus ergebenden unerwünschten Ereignissen, wie sie z.B. in den Jahren 2017 und 2018 aufgetreten sind, entgegenzuwirken. Erst traf die Region ein 1000-jähriges Hochwasser; kurz darauf folgte eine langanhaltende Dürreperiode mit Rekordminuswerten beim Niederschlag und infolge dessen die Knappheit bei der Trinkwasserbereitstellung. Die Untersuchung soll Lösungen aufzeigen, wie sich der Harz mit seinen multifunktionalen Aufgaben im Bereich der Wasserwirtschaft und zukünftig auch das regionale Energiesystem an den Klimawandel anpassen kann.

Durch den jahrhundertelangen Bergbau existieren im Harz eine Vielzahl von über- und untertägigen Bauwerken, die zum Beispiel das bestehende Talsperrensystem erweitern könnten, damit einerseits mehr Trinkwasser bereitgestellt und andererseits die entstehenden zusätzlichen Stauvolumen als Pufferspeicher für die Systemdienstleistungen im Verbund für Hochwasserschutz, Niedrigwasserabgabe und Energiewassergewinnung genutzt werden können. In Ansätzen wurde die diesbezügliche Infrastruktur im Zuge der extremen Trockenheit im vergangenen Jahr schon von den Harzwasserwerken eingesetzt, um mit dem vernetzten System aus den Teichen und Gräben der Oberharzer Wasserwirtschaft die Wasserwirtschaft den veränderten Klimabedingungen anzupassen. Neben der Entwicklung von bereits existierenden Anlagen thematisiert das Forschungsprojekt auch mögliche Neubauten und Erweiterungen von Talsperren und deren wasserwirtschaftliche Vernetzung. Im Fokus steht dabei die Systemintegration von Energie- und Wasseranwendungen im Westharz zur Bereitstellung der Systemdienstleistungen.

Durchgeführt wird das Projekt von der TU Clausthal in Zusammenarbeit mit der TU Braun-

schweig und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.

Die Forschung wird dabei von den Kooperationspartnern Harzwasserwerke GmbH und Harz Energie GmbH & Co. KG sowie einem Praxisbeirat, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern der betroffenen Kommunen und Experten von Landesbehörden, unterstützt. Im Zeitraum von drei Jahren, beginnend im Juli 2019, werden Maßnahmen für den Westharz in aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten im Hinblick auf das angestrebte Ziel erarbeitet. Dabei wurden u.a. meteorologische Klimaszenarien der Vergangenheit und Zukunft verwendet, um das Systemverhalten für den Zeitraum von 2000–2050 mit dem Ziel abzuleiten, daraus mögliche technologische Lösungsmöglichkeiten mit sozio- und ökonomischen Maßstäben zu bewerten.

Methodik

Kern des Projektes ist die Entwicklung einer auf andere mögliche Standorte übertragbare Methodik zur Erbringung der genannten Systemdienstleistungen:

- Hochwasserschutz
- Niedrigwasserabgabe
- Trinkwassergewinnung
- Bereitstellung von Energiespeicherwasser zur Kurzzeitstabilisierung des elektrischen Netzes als Teil des regionalen nachhaltigen Energiesystems

Alle vier Teilsysteme sind gekoppelt und beeinflussen sich dadurch gegenseitig (siehe Abbildung 1). 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-Bauwerke bzw. Neuauffahrungen. Mittels mathematischer Modellrechnungen des Gesamtsystems über lange Zeitperioden werden die Wirkungen der Varianten gegenüber dem heutigen Zustand anhand von Bewertungskriterien quantifiziert.

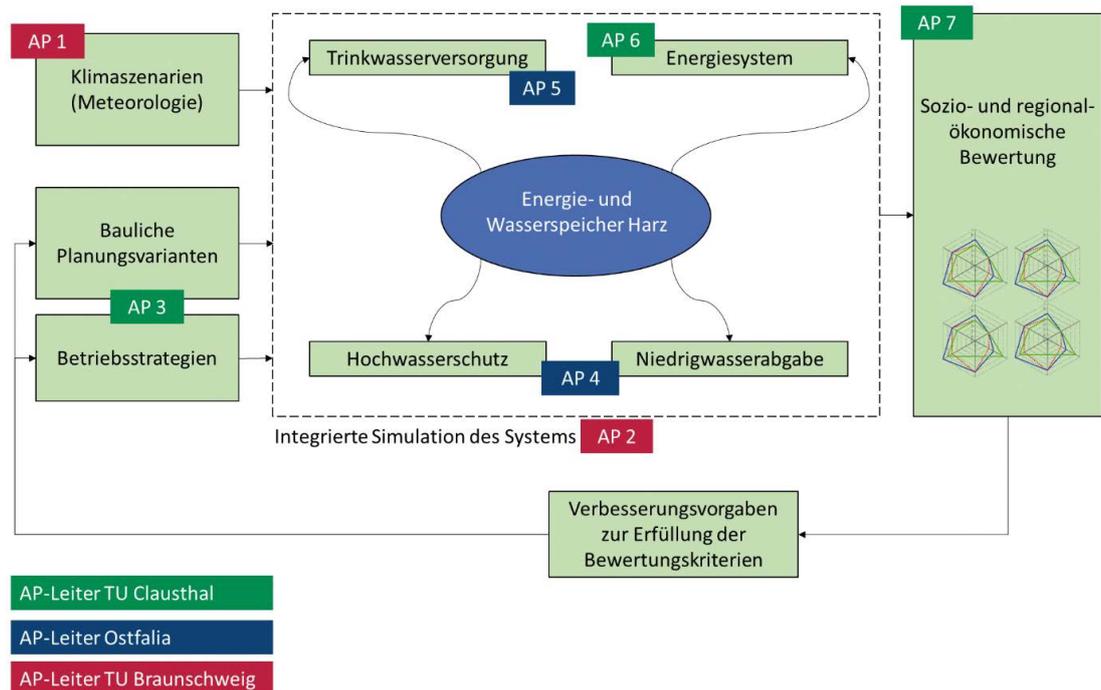


Abbildung 1: Gesamtkonzept des Verbundprojektes.

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.

Projektstand

Zur Lösung dieser Forschungsfragen wurden zunächst potenziell geeignete Standorte ausgehend vom bestehenden System identifiziert, für die dann später bauliche Planungsvarianten und Betriebsstrategien entwickelt werden sollen, die den Möglichkeitsraum für geeignete Maßnahmen bilden. Die Lösungsmöglichkeiten wurden in einer mit Vergangenheitsdaten kalibrierten Simulation analysiert. Sie soll im zweiten Teil des Projektes einer sozio- und regionalökonomischen Bewertung zugeführt werden. Auf Basis dieser Bewertung entstehen Ertüchtigungs-

vorgaben für die baulichen Planungsvarianten und Betriebsstrategien, die festgelegten Bewertungskriterien genügen müssen.

Bis zum derzeit erreichten ersten Meilenstein des Projektes wurden dazu repräsentative Standorte im Westharz identifiziert, die den erwähnten Möglichkeitsraum für die anstehende Vertiefung der Maßnahmen zulassen. Dabei stand und steht der Systemgedanke im Hinblick auf das Zusammenwirken verschiedener Standorte/ Maßnahmen in Bezug auf die verschiedenen Systemdienstleistungen im Vordergrund. Eine exakte Ermittlung sämtlicher maximal möglicher Potenziale im Harz ist dabei aus Zeitgründen nicht möglich und daher auch nicht Ziel dieses Projektes. Falls sie zukünftig gewünscht werden würden, könnte nach der entwickelten Methode ein Folgeprojekt z.B. unter Einbeziehung des Ostharzes aufgesetzt werden.

Bei der Auswahl der Standorte des definierten Möglichkeitsraumes stand neben der Verfügbarkeit von Daten aus vorangegangenen Betrachtungen und der bestehenden Infrastruktur das Bündlungsgebot im Vordergrund. Eine ähnliche Vorgehensweise erfolgt üblicherweise bei der Errichtung von Trassen zur Energieübertragung (z.B. Südlink). Daher wurden insbesondere Standorte ausgewählt, an denen bereits eine entsprechende (wasserwirtschaftliche) Infrastruktur vorhanden ist. Ziel ist somit

eine Minimierung der entstehenden Umweltbelastungen. Dabei sind auch Standorte enthalten, die in der Öffentlichkeit teilweise kritisch gesehen werden, ein Denkverbot haben sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler jedoch nicht auferlegt, obwohl ihnen die Sensitivität dieser Thematik durchaus bewusst ist. Der Betrachtungsraum des Projektes umfasst ausgehend von diesen Randbedingungen folgende Standorte bzw. Regionen (vergleiche Abbildung 2):

- Okertalsperre – Huneberg (HW-Schutz, Niedrigwasserabgabe, Trinkwassernutzung, Energiespeicherwasser mit Unterbecken Okertalsperre)
- Odertalsperre – Stöberhai (Trinkwassernutzung mit neuem Oberbecken für die Energiespeicherwasserspeicherung)
- Wassernutzung im Siebertal (zwei Becken und Energiespeicherwasserspeicherung mit Oberbecken)
- Wassernutzung des Innerstentales (Überleitung von Wasser zur Grane zum Hochwasserschutz und zur Trinkwassergewinnung sowie Energiespeicherwasserbereitstellung mit untertägigen Becken an bestehender Innerstalsperre)
- Granetalsperre (Staudammerhöhung für zusätzliches Trinkwasser sowie Hochwasserschutz und Niedrigwasserabgabe)
- Herzberger Teich (Hochwasserschutz über den Oker-Grane-Stollen)

Aus den bisherigen Analysen dieses Möglichkeitsraumes ergeben sich Größenordnungen für das zusätzlich hebbare Speichervolumen des Westharzes von etwa 90 Millionen m³ und eine maximal installierbare elektrische Leistung von Pumpspeicherkraftwerken von ca. 1.000 MW. Dieses zusätzliche Speichervolumen könnte zu einer zusätzlichen Trinkwassergewinnung in der Größenordnung von 35 Millionen m³ pro Jahr führen. Es handelt sich dabei um eine Größenordnung, die bei einer vollständigen Realisierung sämtlicher Maßnahmen (über- und unter Tage) an den Standorten technisch möglich erscheint. Es ist insoweit eine theoretische Größe, die ohne Berücksichtigung der konkreten Anlagentechnik und der Kosten zum jetzigen Zeitpunkt genannt wird. Die Aussage, welcher Anteil dieses technischen Potentials vor dem Hintergrund der Fragestellungen des Projektes sinnvollerweise nutzbar gemacht werden sollte, bleibt den folgenden konkreten Standortanalysen im Projekt vorbehalten. Insbesondere ergeben sich durch die Konkretisierung einzelner Maßnahmen mit präzisierenden

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
(Forschungszentrum
Energiespeichertechnologien (EST)
und CUTEC Forschungszentrum)

Projektkoordinator:

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



Hans-Peter Beck



Jens zum Hingst

Bewertungskenngrößen Vergleiche mit einer Priorisierung der aufgeführten Maßnahmen aus wissenschaftlicher Sicht.

Als nächste Schritte erfolgen dazu die detaillierte Betrachtung der Standorte etwa in Hinblick auf gebirgsmechanische Eigenschaften oder die exemplarische Auslegung elektrischer Anlagen sowie die kalibrierte Simulation der Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft

des Gesamtsystems. Diese dient zur systemtechnischen Analyse der angestrebten (teilweise) konkurrierenden Nutzungen der Einzelmaßnahmen für den Hochwasserschutz, die Niedrigwasserabgabe und Trinkwasserbereitstellung sowie die Energiespeicherwasserbereitstellung. Darauf aufbauend wird die Bewertung und Priorisierung der verschiedenen Maßnahmen durch die Projektbeteiligten vorgenommen.

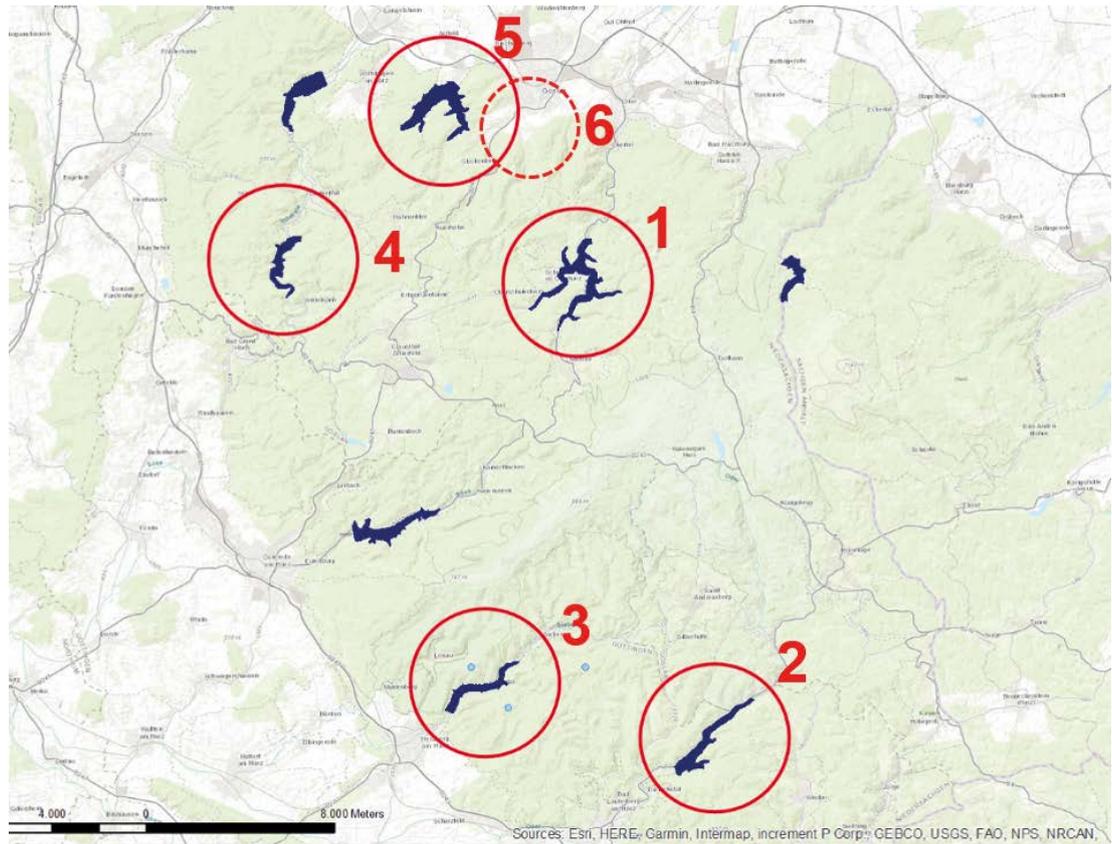


Abbildung 2: Standorte als Betrachtungsraum des Projektes (laufende Nummerierung, keine Aussage über Prioritäten, Quelle: Ostfalia).

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

Kurzfassung

Das Forschungsprojekt „Huntorf 2020 – Technologieentwicklung und Effizienzgewinn durch Neu-Konzipierung des Gesamtprozesses Druckluftspeicher-kraftwerk Huntorf mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff“ wurde für eine Projektlaufzeit von drei Jahren (Januar 2018 bis Dezember 2020) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. In drei Betrachtungsebenen wurde die Machbarkeit der Wasserstoffverbrennung im bestehenden Druckluftspeicher-kraftwerk Huntorf untersucht. Mehrere CFD-Simulationen zeigen eine Machbarkeit der Substitution bis zu einem Anteil von 60 % Wasserstoff im Brennstoff ohne signifikante Erhöhung der Instabilität oder der Schadstoffemissionen. Aus thermodynamischer Sicht tragen eine Erhöhung des maximalen Drucks und der maximalen Temperatur in der Druckluftkaverne und ein Rekuperator sowohl zur Kraftwerkseffizienz als auch zur Flexibilität bei. So bewirkt die Erhöhung des maximalen Speicherdrucks um 30 bar in der Salzkaverne eine Speicherkapazitätserhöhung um 70 %. Das Energiesystemmodell zeigt, dass ein Retrofit

des Kraftwerks (erhöhte Ein- und Ausspeicherleistung, erhöhte Speicherkapazität und Rekuperation) bei gleichzeitiger Teilnahme am Day-Ahead- und Minutenreservemarkt bis zu sieben Mal höhere Jahreserlöse verspricht als das vorhandene Speicherkraftwerk, wobei der Rekuperator einen stärkeren Einfluss auf die Erlöse hat als die Erhöhung der Speicherkapazität und Leistung. Ein Betrieb mit Wasserstoff ist dabei nur unwesentlich teurer. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für zukünftige Untersuchungen zur Wasserstoffstrategie am Kraftwerksstandort Huntorf.

Abstract

The research project "Huntorf 2020 – technology development and efficiency gains through redesign of the overall process compressed air storage power plant Huntorf with regeneratively generated hydrogen" was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy for a project period of three years (January 2018 to December 2020). The feasibility of hydrogen combustion in the existing Huntorf compressed air storage power plant was examined on three levels. Multiple CFD simulations show a feasibility of substitution up to a proportion of 60 % hydrogen in the fuel without a significant increase in instability or pollutant emissions. From a thermodynamic point of view, an increase in the maximum pressure and temperature in the compressed air cavern and a recuperation contribute to both power plant efficiency and flexibility. For example, increasing the maximum storage pressure by 30 bar in the salt cavern increases storage capacity by 70 %. The energy system model shows that a retrofit of the power plant (increased charging and discharging power, increased storage capacity and recuperation) with simultaneous participation in the day-ahead and minute reserve market promises up to seven times higher annual revenues than the existing storage power plant,

Projektpartner

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

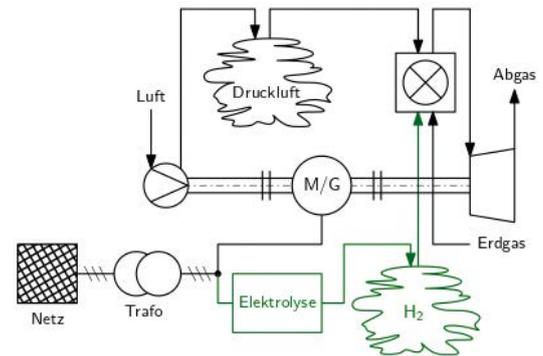


Abbildung 1: Foto des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf und Blockschaltbild mit der Erweiterung um Elektrolyse und Wasserstoff-Kavernenspeicher in grün.

with the recuperation having a stronger influence on the proceeds as the increase in storage capacity and performance. The plant operation with hydrogen is only marginally more expensive. The results serve as the basis for future investigations into the hydrogen strategy at the Huntorf power plant.

Projektziele

Das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf ist einzigartig in Europa. Das Konzept basiert auf einem offenen Gasprozess, wobei Kompression und Entspannung der Verbrennungsluft zeitlich entkoppelt sind. Im Kompressorbetrieb wird bei elektrischer Nennleistung von 68 MW Umgebungsluft auf bis zu 70 bar verdichtet und anschließend in zwei 310.000 m³ fassenden unterirdischen Salzkavernen gespeichert. Im Generatorbetrieb wird die gespeicherte Druckluft in der Brennkammer des Kraftwerks mit Erdgas erwärmt und anschließend bei einer elektrischen Nennleistung von 327 MW auf Umgebungsdruck entspannt.

Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Anpassung des von Uniper betriebenen Druckluftspeicherkraftwerkes Huntorf an die Herausforderungen der Energiewende. Zukünftig soll das Kraftwerk möglichst CO₂-arm bis CO₂-frei und hochflexibel die fluktuierende erneuerbare Erzeugung in der Region ergänzen. Hierzu wird das Kraftwerk um einen Elektrolyseur und einen Wasserstoffspeicher ergänzt. Abbildung 1 zeigt das Blockschaltbild des Kraftwerks Huntorf inkl. der Erweiterung um eine Elektrolyse und einen Wasserstoff-Kavernenspeicher. Die teilweise oder vollständige Substitution von Erdgas durch regenerativ und vor Ort erzeugten Wasserstoff stellt einen zentralen Aspekt des

Forschungsprojekts dar. Hier können sowohl die Treibhausgas-Emissionen gesenkt als auch die Kraftwerksflexibilität erhöht werden. Das Speicherkraftwerk Huntorf dient somit als Blaupause für eine zukünftige, hochflexible Kraftwerksgeneration.

Die Untersuchungen erfolgen auf drei Betrachtungsebenen: In CFD-Modellen werden die Verbrennungsvorgänge innerhalb der Hochdruckbrennkammern detailliert simuliert, in einem thermodynamischen Gesamtmodell wird das gesamte Druckluftspeicherkraftwerk bilanziert und ein Energiesystemmodell betrachtet das Speicherkraftwerk innerhalb des Energiesystems im lokalen Kontext, wobei vorhandene Energieszenarien und -prognosen Berücksichtigung finden.

Ergebnisse

CFD-basierte Analyse der Verbrennungsprozesse

Bei der Substitution von Erdgas durch Wasserstoff ergeben sich aufgrund des geringeren Molekulargewichts, des hohen Heizwerts, des geringeren O₂-Bedarfs, der hohen Diffusivität und der hohen adiabatischen Temperatur zahlreiche wissenschaftliche Fragestellungen. Daher wird anhand von detaillierten Computational-Fluid-Dynamics-Analysen der Brennkammer untersucht, in welchem Maß eine Zufeuerung oder Substitution von regenerativem Wasserstoff mit nur geringer anlagentechnischer Änderung der Bestandsanlage Huntorf möglich ist. Basierend auf einer Neubzw. Weiterentwicklung von Reaktionsmechanismen der Hochdruck-Verbrennung von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen werden die

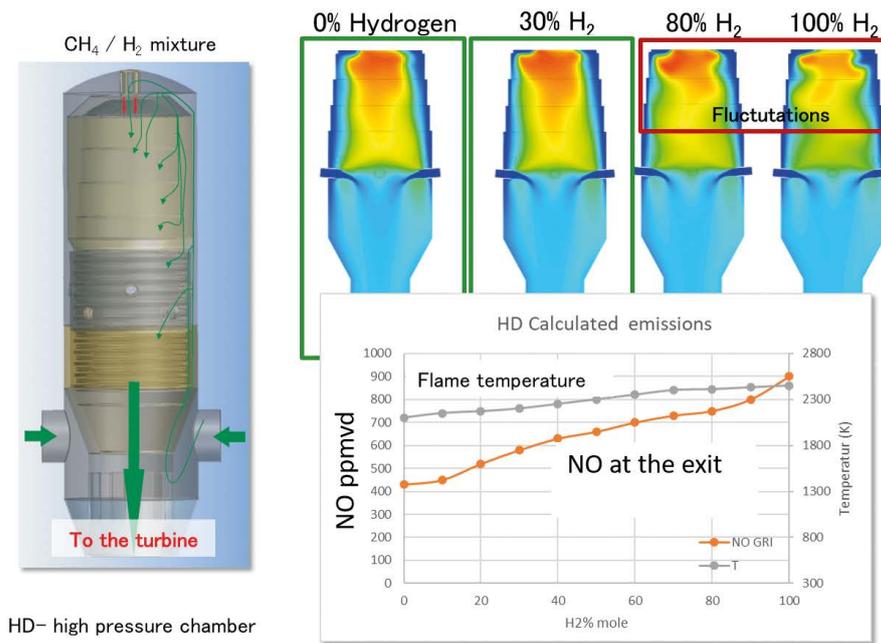


Abbildung 2: CFD-Modell der Hochdruckbrennkammer (links), Temperaturprofile der Flamme in der HD-Brennkammer (oben) und Flammentemperatur und NO-Konzentration am Austritt der HD-Brennkammer (unten) für unterschiedliche Wasserstoffkonzentrationen im Brennstoff.

Flammenzündung, die Flammenstabilität, die In-Flame-Temperaturen, die Schadstoffemissionen und eventuelle Schwingungen untersucht, wobei sowohl die Wärmeübertragung als auch die Gasstrahlung berücksichtigt werden. Von besonderem Interesse ist hierbei die mögliche Verschiebung der Flammenfront, die zu lokalen Temperaturspitzen und damit zur thermischen Überbelastung innerhalb der Brennkammer führen kann.

In Abbildung 2 sind die Flammenprofile der Hochdruckbrennkammer des Kraftwerkes Huntorf für eine sukzessive Anreicherung des Brennstoffs mit Wasserstoff (Wasserstoffanteil im Brennstoff von 0 %, 30 %, 80 % und 100 %) abgebildet. Diese Simulationen zeigen, dass sich die Flammenprofile bis zu einem Anteil von 60 vol.-% Wasserstoff im Brennstoff kaum verändern und somit keine baulichen Veränderungen notwendig sind. Bei höheren Wasserstoffanteilen wird die Flamme instabiler und die Austrittsgeschwindigkeit des Brennstoffs aus den Brennstofföffnungen steigt von 100 m/s bei einem Einsatz von reinem Erdgas auf eine Geschwindigkeit von fast 250 m/s bei einem Einsatz von reinem Wasserstoff. Die NO_x-Emissionen der Hochdruckkammer nehmen mit dem Wasserstoffanteil im Brennstoff von 420 ppm auf 900 ppm zu, während die CO-Emissionen von 1000 ppm auf 0 sinken. Aus den Ergeb-

nissen folgt, dass grundsätzlich Wasserstoff im Kraftwerk Huntorf eingesetzt werden kann, für eine vollständige Bewertung der Thematik, vor allem hinsichtlich einer vollständigen Substitution, jedoch weitere experimentelle Untersuchungen notwendig sind.

Die Substitution mit Wasserstoff ermöglicht des Weiteren einen verbesserten Teillastbetrieb und somit eine höhere Einsatzflexibilität. Der erhebliche Anstieg der CO-Emissionen im Teillastbetrieb kann durch die Reduzierung des verfügbaren Kohlenstoffs im Brennraum nach Verdünnung oder Substitution des Erdgases mit Wasserstoff stark kompensiert werden. Dabei ist kein signifikanter Anstieg der NO-Emissionen im Teillastbetrieb festzustellen.

Thermodynamische Modell des Kraftwerks Huntorf

Die in Betrachtungsebene 1 ermittelten Betriebsgrenzen und -eigenschaften können in der darüber liegenden Modellebene – dem thermodynamischen Gesamtmodell – verwendet werden, um den Gesamtprozess einschließlich verschiedener Konzeptvarianten darzustellen. Das stationäre Modell des Kraftwerks basiert auf Messdaten des Kraftwerksbetreibers UNIPER und den Hauptsätzen der Thermodynamik und ermöglicht die Bestimmung der Gesamtwir-

Tabelle 1: Wirkungsgrade des Druckluftspeicherkraftwerks Huntorf.

Wirkungsgrad	Formel	Basierend auf dem 1. Hauptsatz	Basierend auf dem 2. Hauptsatz
η_{CAES}	(eingespeiste el. Energie) / (gespeicherte el. Energie + Brennstoffenthalpie)	39,9 %	49,4 %
η_{th}	(eingespeiste el. Energie - entnommene el. Energie) / Brennstoffenthalpie	9,6 %	13,3 %
η_{rt}	(eingespeiste el. Energie) / (entnommene el. Energie)	2,9 %	33,3 %

kungsgrade basierend auf energetischen und exergetischen Bilanzierungen sowie die inneren Wirkungsgrade der Verdichter- und Turbinenstufen. Hier werden drei verschiedene Gesamtwirkungsgrade untersucht, siehe Tabelle 1.

Ein dynamisches Modell des Druckluftspeicherprozesses ist unabdingbar aufgrund der Druck- und Temperaturänderungen in der Salzkaverne während des Ein- und Ausspeicherbetriebs und der häufigen An- und Abfahrvorgänge. Anhand des stationären und des dynamischen Modells des Druckluftspeicherkraftwerks konnten drei Kraftwerksvarianten untersucht werden. Die Erhöhung des maximalen Speicherdrucks um 30 bar in der Salzkaverne bewirkt eine Speicherkapazitätserhöhung um 70 %. Durch den ausschließlichen Betrieb der Hochdruckbrennkammer (kalte Entspannung, keine Nachver-

brennung in der Niederdruckbrennkammer), kann die Brennstoffeffizienz erhöht werden. Der Wirkungsgrad erhöht sich außerdem, wenn die maximale Speichertemperatur in der Kaverne erhöht wird oder ein Rekuperator eingesetzt wird.

Energiesystemmodell des (Wasserstoff-) Druckluftspeicherkraftwerks

Die Betriebseigenschaften aus den Betrachtungsebenen 1 und 2 werden in der obersten Betrachtungsebene, die das regionale Energiesystem am Standort Huntorf darstellt, verwendet. Das Druckluftspeicherkraftwerk kann am Day-Ahead- und Regelleistungsmarkt teilnehmen oder alternativ durch die Glättung der regionalen Residuallast netzdienlich betrieben werden. Um verschiedene Anlagenweiterun-

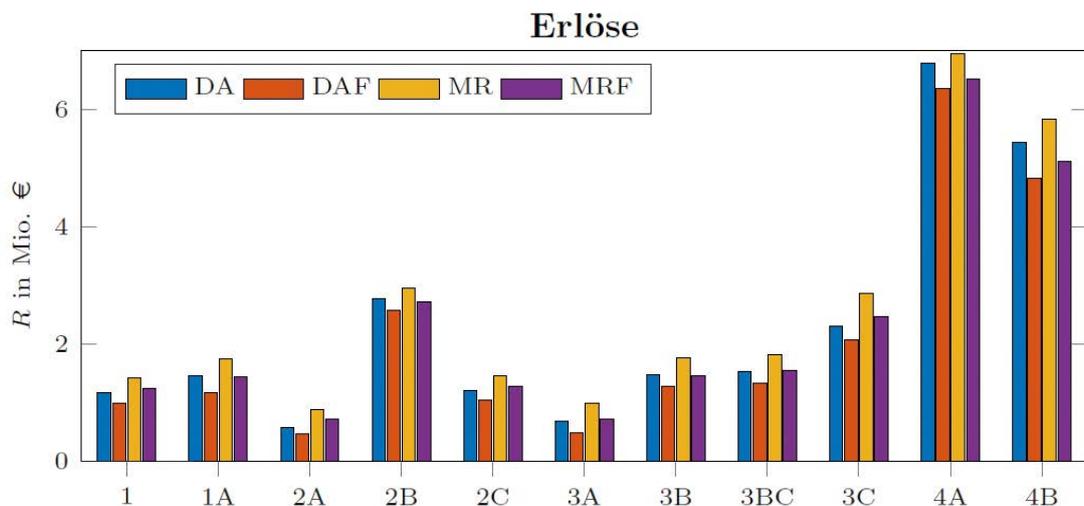


Abbildung 3: Durchschnittliche jährliche Erlöse für Anwendungsfälle DA (Teilnahme am Day-Ahead-Markt), DAP (Teilnahme am Day-Ahead-Markt mit rollierender Planung), MR (Teilnahme am Day-Ahead- und Minutenreserve-Markt) und MRP (Teilnahme am Day-Ahead- und Minutenreserve-Markt mit rollierender Planung) für verschiedene Anlagenvarianten.

1	Kraftwerk Huntorf
1A	Höhere Speicherkapazität
2A	Wasserstoffverbrennung (Einkauf über festen Wasserstoffpreis)
2B	Rekuperator
2C	Teillastbetrieb (kalte Verbrennung) möglich
3A	Wasserstoffverbrennung in HD-Brennkammer, Elektrolyse mit 20 MW
3B	Wasserstoffverbrennung in HD-Brennkammer, Elektrolyse mit 120 MW
3C	Wasserstoffverbrennung in HD-Brennkammer, Elektrolyse mit 470 MW
4A	Retrofit
4B	Retrofit mit Wasserstoffverbrennung in beiden Brennkammern, Elektrolyse 500 MW

Tabelle zu Abbildung 3.

gen und Anwendungsszenarien zu vergleichen, wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell des Kraftwerks entwickelt. Dieses bildet das derzeitige Kraftwerkskonzept und Konzeptvarianten wie erhöhte Speicherkapazität, bessere Brennstoffeffizienz durch Rekuperator und Teillastbetrieb durch kalte Entspannung ab. Zusätzlich wird das Kraftwerkskonzept eines hochflexiblen und regenerativen Wasserstoff-Druckluft-Speicherkraftwerks modelliert, um die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse und die lokale Nutzung im Druckluftspeicherkraftwerk abzubilden.

Die jährlichen Erlöse der marktorientierten Anwendungsfälle sind in Abbildung 3 dargestellt und liegen zwischen ca. 0,5 Millionen Euro und 7 Millionen Euro. Die Erlöse berechnen sich aus dem Gewinn, der durch den Verkauf von Energie am Day-Ahead-Markt oder der Teilnahme am Minutenreservemarkt erzielt wird, abzüglich der Kosten für den Einkauf von Energie und Brennstoff sowie der Startkosten. Ein Retrofit des Kraftwerks (erhöhte Ein- und Ausspeicherleistung, erhöhte Speicherkapazität und Rekuperation) verspricht bei gleichzeitiger Teilnahme am Day-Ahead- und Minutenreservemarkt die höchsten Jahreserlöse. Dabei wirkt sich die Verbesserung der Brennstoffeffizienz durch Rekuperation stärker auf die Erlöse aus als die Erhöhung der Speicherkapazität und Leistung. Die jährlichen Erlöse der Anlagenvarianten mit Elektrolyse hängen stark von der Nennleistung des Elektrolyseurs ab. Die zusätzliche Teilnahme am Minutenreservemarkt bringt nur

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

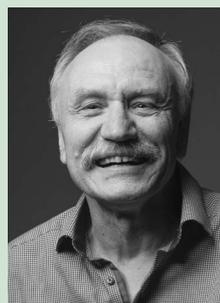
Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Roman Weber

E-Mail: info@ievb.tu-clausthal.de

Teilprojektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Beck



Roman Weber



Hans-Peter Beck

wenige zusätzliche Erlöse im Vergleich zur alleinigen Teilnahme am Day-Ahead-Markt.

Alternativ kann das Kraftwerk netzdienlich betrieben werden, indem die Spitzenlastdifferenz der Residuallast minimiert wird und überschüssige erneuerbare Energie gespeichert wird. Darüber hinaus kann das Kraftwerk Systemdienstleistungen wie Frequenzhaltung (im Kompressor- und Generatorbetrieb), Bereitstellung von Blindleistung und Schwarzstartkapazität anbieten und so als Vier-Quadranten-Speicherkraftwerk fungieren.

Ausblick

Das Innovationslabor H₂-ReNoWe (Wasserstoffregion Nord-West-Niedersachsen) mit Projektbeginn im Mai 2021 baut auf den Ergebnissen aus Huntorf 2020 auf. Es wird untersucht, wie das Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf mittelfristig in eine CO₂-vermeidende Betriebsweise überführt und als Nukleus für eine Wasserstoffwirtschaft in der Region Wesermarsch

verankert werden kann. Hierzu wird das zusätzliche Wertschöpfungspotenzial durch Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff unter Verwendung von erneuerbarem Strom aus der Region untersucht. Die gewonnenen Ergebnisse zu Auslegung und Betrieb des Kraftwerks können zur Konzeptionierung einer neuen Generation von Wasserstoff-Druckluft-Speicherkraftwerken genutzt werden und erschließen zusätzlich neue Möglichkeiten für die Vermarktung von lokal produziertem Wasserstoff und dessen Integration in den Mobilitätssektor. Hier werden vielfältige Aspekte der Anlagen und des Betriebs des Speicherkraftwerks detailliert untersucht. Dazu gehört das regionale Energiesystem, die Speicherung von Wasserstoff in einer Salzkaverne, die Auswirkungen eines dynamischen Betriebs auf die Alterung der Elektrolyse und der netzdienliche Betrieb des Umrichters der Elektrolyse. Zusätzlich werden die Ergebnisse aus Huntorf 2020 genutzt, um die Forschungen im Bereich der Wasserstoffverbrennung fortzuführen und das Energiesystemmodell weiterzuentwickeln und um ein dynamisches Modell zu erweitern.

SINTEG-Projekt enera – Teilprojekt Analyse aktueller energiewirtschaftsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie Anpassungsvorschläge für die Zukunft

Kurzfassung

In einem Teilprojekt energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen des vom BMWi geförderten SINTEG-Projekts enera wurde im Berichtszeitraum ein Hybridmodell zur Flexibilitätsbeschaffung für das Engpassmanagement im Stromnetz untersucht. Flexibilität muss im deutschen Recht durch Erzeugungsanlagen und Stromspeicher gegen eine kostenbasierte Vergütung zur Verfügung gestellt werden, wenn der Netzbetreiber dies anfordert. Das Hybridmodell ergänzt diesen Ansatz um die freiwillige Bereitstellung von Flexibilität durch Verbrauchsanlagen gegen eine vereinbarte Vergütung. Dies entspricht dem Grundsatz der marktbasieren Flexibilitätsbeschaffung nach europäischem Recht und kann weitere Flexibilitätsoptionen für das Engpassmanagement erschließen. Das untersuchte Hybridmodell erscheint insgesamt mit deutschem und europäischem Recht vereinbar.

Abstract

As part of the SINTEG-Project enera, funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, a hybrid procurement model for flexibility to alleviate power grid congestion was developed. Under German law, power plants and power storage facilities must provide flexibility against cost-based remuneration, if the grid operator demands for it. The hybrid procurement model supplements this approach by including demand side flexibility offered voluntarily for an agreed upon compensation. This corresponds with the principle of market-based congestion management under European Law and allows to include demand side flexibility into congestion management. The developed

hybrid procurement model appears to be compatible with German and European Law.

SINTEG-Projekt „enera“

Das Teilprojekt „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 umfasste die Jahre 2017–2020. Das Teilprojekt wurde von Prof. Dr. Hartmut Weyer, Direktor des Instituts für deutsches und internationales Berg- und Energierecht der TU Clausthal, geleitet. Die Leitung des Konsortiums aus 32 Projektpartnern und 32 assoziierten Partnern oblag der EWE AG. Das Projekt hatte zum Ziel, als Reallabor in der windenergiereichen Projektregion im Nordwesten Deutschlands skalierbare Lösungsansätze für die Herausforderungen der Energiewende zu demonstrieren.

Die sich hieraus ergebenden juristischen Fragestellungen wurden untersucht und mit den Projektpartnern aus Wirtschaft und Wissenschaft diskutiert. Die Projektstätigkeit musste laufend neue rechtliche Rahmenbedingungen berücksichtigen. Auf europäischer Ebene wurden während des Projekts verschiedene Richtlinien und Verordnungen des Gesetzespakets „Saubere Energie für alle Europäer“ („Clean Energy Package“) verabschiedet, im deutschen Recht wurde der rechtliche Rahmen durch das Gesetz zur Beschleunigung des Energieleitungsbaus (sog. NABEG 2.0) und das Ende 2020 beschlossene EEG 2021 erheblich weiterentwickelt. Schwerpunkt des Teilprojekts war das Management von Netzengpässen, die in der Projektregion durch die hohen Erzeugungskapazitäten an erneuerbaren Energien häufig auftreten.

Projektpartner

- EWE AG Oldenburg (Konsortialführer), 32 Konsortialpartner und 32 assoziierte Partner, www.energie-ernetzen.de

Ausgewählte Projektergebnisse: Hybridmodell zur Flexibilitätsbeschaffung

Speziell untersucht wurde die rechtliche Zulässigkeit eines hybriden Beschaffungsmodells für

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:

01.01.2020–31.12.2020

Projektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

Projektbearbeiter:

Dipl.-Jur. Thore Iversen



Hartmut Weyer



Thore Iversen

Flexibilität im Stromnetz, um Netzengpässe aufgrund hoher Windenergieeinspeisung zu beheben. Die Flexibilität wird benötigt, um einerseits den Stromfluss über überlastete Netzbetriebsmittel zu reduzieren und andererseits die benötigte Strommenge an anderer Stelle erneut bereitzustellen (sog. energetischer Ausgleich). In einem hybriden Beschaffungsmodell werden die nicht marktbasierete Beschaffung von Flexibilität aus Erzeugungsanlagen und Stromspeichern mit der marktbasiereten Beschaffung von Flexibilität aus Verbrauchsanlagen kombiniert. Im Teilprojekt wurde ein Modell für eine solche hybride Beschaffung erarbeitet und dessen rechtliche Zulässigkeit untersucht.

In Deutschland müssen Erzeugungsanlagen und Stromspeicher Flexibilität für das Engpassmanagement großenteils verpflichtend gegen kostenbasierte Vergütung zur Verfügung stellen. Dies geschieht überwiegend durch Redispatch nach §§ 13 Abs. 1 Nr. 2, 13a EnWG und bei erneuerbaren Energien bzw. KWK-Anlagen durch Einspeisemanagement nach §§ 14, 15 EEG 2017/2021. Diese nicht marktbasierete, sondern kostenbasierte Beschaffung wird ab dem 1.10.2021 durch den sog. Redispatch 2.0 noch zusätzlich ausgeweitet. Daneben bestehen nach deutschem Recht teilweise auch Möglichkeiten zur marktbasiereten Beschaffung, etwa durch Countertrading, die jedoch eine geringere Rolle spielen.

Demgegenüber sind im Europarecht als Teil des Clean Energy Package eine neue Elektrizitätsbinnenmarktverordnung und eine neue Elektrizitätsbinnenmarkttrichtlinie in Kraft getreten, die eine marktbasierete Beschaffung von Flexibilität als Regelfall vorsehen. Ausnahmen sind nur unter bestimmten Voraussetzungen zulässig. Nach Auffassung des deutschen Gesetzgebers sind diese Ausnahmen für die Beschaffung von Flexibilität aus Erzeugungsanlagen und Stromspeichern gegeben.

Vor diesem Hintergrund wird eine hybride Flexibilitätsbeschaffung diskutiert. Das untersuchte Modell geht vor dem Hintergrund der §§ 13 Abs. 1 Nr. 2, 13a EnWG davon aus, dass Flexibilität aus Erzeugungsanlagen und Stromspeichern nicht marktbasieret beschafft werden darf und kostenbasieret vergütet wird. Eine kostenbasieret vergütete und zwingende Bereitstellung von Flexibilität aus Verbrauchsanlagen ist hingegen, abgesehen von Stromspeichern, nicht vorgesehen. Solche lastseitige Flexibilität, z.B. durch ab- oder zuschaltbare Lasten in der Industrie, kann aufgrund von entsprechenden Angeboten der Betreiber marktbasieret beschafft

und vergütet werden. Die Erschließung von lastseitiger Flexibilität ist auf solche Angebote angewiesen, da Lasten im Allgemeinen nicht kostenbasiert vergütet werden können. Denn die entstehenden Kosten hängen in der Regel maßgeblich von den Opportunitätskosten der Betreiber ab, die sowohl zeitlich als auch örtlich erheblich variieren können.

Im untersuchten Hybridmodell werden die zur Verfügung stehenden Flexibilitätsoptionen ausschließlich nach den entstehenden Kosten der Flexibilitätsbeschaffung ausgewählt. Lastseitige Flexibilität kommt daher nur dann zum Einsatz, wenn die entstehenden Kosten unter den Kosten der günstigsten, alternativ zur Verfügung stehenden Erzeugungs- oder Stromspeicheranlage liegen. Bei dem Vergleich der Kosten sind neben der Vergütung pro Energieeinheit (kostenbasierte Vergütung bzw. Angebotspreis) auch die benötigte Energiemenge – die insbesondere von der Sensitivität der Anlage auf den Engpass abhängt – sowie die Kosten für den energetischen Ausgleich zu berücksichtigen. Für eine erste juristische Untersuchung wurde hierbei unterstellt, dass die Höhe der kostenbasierten Vergütung für Erzeugungs- und Stromspeicheranlagen, auf die zugegriffen werden könnte, jeweils im Voraus bekannt ist, sodass diese mit den Kosten für lastseitige Flexibilitätsbeschaffung verglichen werden kann.

Untersucht wurde der rechtliche Rahmen für die Flexibilitätsbeschaffung nach deutschem und europäischem Recht. Eine besondere Rolle spielte dabei die Frage, inwieweit die Ausnahmetatbestände nach Art. 13 Abs. 2 Elektrizitätsbinnenmarktverordnung ein Abweichen von einer marktbasierter Flexibilitätsbeschaffung erlauben. Die bestehenden Ausnahmen schließen die Anwendung eines Hybridmodells nicht grundsätzlich aus. Zudem könnten langfristige Flexibilitätsprodukte und die marktbasierter Beschaffung zuschaltbarer Lasten der Gefahr strategischen Bietverhaltens bei der Flexibilitätsbeschaffung entgegenwirken.

Das Hybridmodell führt außerdem zu unterschiedlichen Beschaffungs- und Vergütungsmechanismen für Flexibilität. Flexibilität aus Erzeugungs- und Stromspeicheranlagen könnte zwangsweise gegen kostenbasierte Vergütung in Anspruch genommen werden, Flexibilität aus Verbrauchsanlagen hingegen nur bei freiwilligem Angebot und gegen eine sich am Markt bildende Vergütung. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, ob die unterschiedliche Behandlung von Flexibilitätsoptionen mit dem

Gleichheitssatz nach europäischem und deutschem Recht vereinbar ist, ob also eine sachliche Rechtfertigung für die Ungleichbehandlung vorliegt. Hierfür ist entscheidend, dass die Opportunitätskosten von Lasten in der Regel nicht pauschal ermittelbar sind und erheblichen Schwankungen unterliegen können. Zudem ist zu berücksichtigen, dass von der Laststeuerung betroffenen Verbraucher (in Industrie, Gewerbe und privaten Haushalten) erheblich intensiver betroffen sein können. Im Übrigen bestehen keine realistischen alternativen Beschaffungsmöglichkeiten für lastseitige Flexibilität. Im Ergebnis ist die unterschiedliche Behandlung verschiedener Flexibilitätsoptionen durch das Hybridmodell daher sachlich zu rechtfertigen.

Soweit das deutsche Recht für den Redispatch der Erzeugung und der Stromspeicherung verpflichtend einen kostenbasierten Redispatch vorsieht, schließt dies die marktbasierter Beschaffung lastseitiger Flexibilität nicht aus. Hierfür ist jedoch eine Beschaffung über gemeinsame Internetplattform aller Übertragungsnetzbetreiber bzw. aller Verteilernetzbetreiber vorgeschrieben. Dies würde die praktische Umsetzung erheblich erschweren, da eine solche gemeinsame Internetplattform bislang nur für Übertragungsnetzbetreiber besteht. Es bestehen allerdings erhebliche Zweifel, ob diese Anforderung des deutschen Rechts mit den Vorgaben von Art. 13 Elektrizitätsbinnenmarktverordnung und Art. 32 Elektrizitätsbinnenmarkttrichtlinie vereinbar ist.

Ergebnispublikationen

Die Ergebnisse und Handlungsempfehlungen des vierjährigen enera-Projekts sind in einem Projektmagazin und einem Projektkompodium veröffentlicht worden. Ausgewählte rechtswissenschaftliche Untersuchungen des an der TU Clausthal bearbeiteten Teilprojekts sind in einem Abschlussbericht in der Schriftenreihe des EFZN erschienen.

Literatur

- Weyer, Hartmut und Iversen, Thore: Grundzüge des Redispatch 2.0, RdE 2021, 1–12.
- Weyer, Hartmut und Iversen, Thore: Handlungsoptionen zur Gestaltung des regulatorischen und energierechtlichen Rahmens im enera-Projekt-Abschlussbericht, Band 71 der EFZN-Schriftenreihe, Göttingen 2021 [OpenAccess].

SiNED – Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation

Kurzfassung

Die voranschreitende Energiewende und die Entwicklung hin zu einem europäischen Strombinnenmarkt stellen die Netzbetreiber der Elektrizitätsversorgungsnetze zunehmend vor neue Herausforderungen. Der wachsende Anteil erneuerbarer Energien, aber auch die fortschreitende Digitalisierung führen zu deutlichen Veränderungen im Stromnetz. Dies erfordert Anpassungen in den bisherigen Steuerungsprozessen ebenso wie bei den zugrundeliegenden Kommunikationswegen. Die dezentrale Erzeugung, verbunden mit Schwankungen in der Erzeugung insbesondere durch Wind- und Solaranlagen, erschwert zudem die Prognose und erfordert sowohl auf Verbrauchs- als auch auf Erzeugungsseite eine stärkere Flexibilisierung. Das vom niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderte Forschungsprojekt „SiNED“ erarbeitet Lösungsansätze für den sicheren Betrieb künftiger Stromnetze auch bei fluktuierender Einspeisung.

Projektpartner

- TU Braunschweig – elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Institut für Vernetzte Energiesysteme Oldenburg
- OFFIS e.V. – Institut für Informatik Oldenburg
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg – Department für Informatik, Abteilung für Digitalisierte Energiesysteme
- Leibniz Universität Hannover – Institut für Elektrische Energiesysteme, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
- Leibniz Universität Hannover – Institut für Wirtschaftsinformatik
- TU Clausthal – Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht

Abstract

The proceeding energy transition and the development of the European internal market for electricity pose increasing challenges to electricity grid operators. The rising share of renewable energies in the grid along with the continuing digitalization cause significant changes in the grid. This in turn requires adjustments in the control processes as well as the underlying communication processes. The decentralized and volatile power generation especially from solar plants and wind turbines complicates the prognosis and requires more flexibility on the demand side as well as in the generation. The research project “SiNED”, funded by the Lower Saxony Ministry for Science and Culture, develops solutions for the safe operation of future power grids that can accommodate fluctuating power generation.

Projekthintergrund

Neben Veränderungen durch die Energiewende und verstärkte Digitalisierung wird auch auf europäischer Ebene die Verwirklichung der Energieunion vorangetrieben, wodurch eine deutliche Zunahme des gebotszonenübergreifenden Handels und länderübergreifender Stromflüsse zu erwarten ist.

Dabei ist die kontinuierlich sichere Stromversorgung auch bei wachsender Volatilität der Erzeugung sicherzustellen. War die bestehende Netzinfrastruktur bislang weitestgehend auf die Stromerzeugung aus konventionellen Großkraftwerken zugeschnitten, wird ein Großteil der innerdeutschen Stromerzeugung bereits heute dezentral aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen. Mit zunehmender dezentraler Erzeugung spielen auch kleinere, verteilte Erzeugungsanlagen eine größere Rolle.

Das Forschungsprojekt SiNED entwickelt im Rahmen des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen die aktuellen Modelle zur Erbringung von Systemdienstleistungen weiter, um sie an diese veränderten Gegebenheiten anzupassen. Hierzu befassen sich neun Teil-

projekte aus drei Kompetenzbereichen mit Fragen der koordinierten Bereitstellung von Systemdienstleistungen und Engpassmanagement, Regelungstechnik und Schutzsystemen, dem Umgang mit Prosumern und Speichern, Plattformen zur Erbringung von Systemdienstleistungen, Datenstrukturen sowie möglichen Angriffsszenarien. Dabei spielen neben energie- und informationstechnischen sowie wirtschaftswissenschaftlichen Aspekten auch juristische Fragestellungen eine besondere Rolle und bilden ein eigenes Teilprojekt unter der Leitung von Prof. Dr. Hartmut Weyer. Dieses Teilprojekt beschäftigte sich im Berichtszeitraum einerseits mit rechtlichen Fragen bei der Datennutzung zur Erbringung von Systemdienstleistungen und andererseits mit solchen des Engpassmanagements.

Datennutzung bei der Erbringung von Systemdienstleistungen

In Stromnetzen mit zunehmend dezentraler Einspeisung, aktiven Kunden und wachsenden Steuerungsmöglichkeiten gewinnt die Messung von Ein- und Ausspeisung sowie die Überwachung des Netzzustands an Bedeutung. Dies spiegelt sich unter anderem in Bemühungen um den Roll-Out von Smart-Metern und in diesem Zusammenhang anzupassende Kommunikationsstrukturen, wie dem Übergang von kettenförmiger zu sternförmiger Marktkommunikation, wider. Aber auch neue Geschäftsmodelle beruhen auf der steigenden Verfügbarkeit von (Verbrauchs-)Daten. Sie zielen darauf ab, Endkunden mehr Kontrolle über ihren Stromverbrauch zu geben, oder ihnen die Teilnahme an neuen Märkten, z.B. zur Erbringung von Regelenergie, zu ermöglichen. Zugleich werden die rechtlichen Anforderungen an die Datennutzung zunehmend detaillierter geregelt. Des Weiteren verändern neue Technologien den Umgang und die Auswertung einmal erhobener Daten – seien dies auf Geräteebene neue oder weiterentwickelte Smart-Meter oder auf Programmebene Distributed-Ledger-Technologien wie Blockchains.

Vor diesem Hintergrund behandelte das Teilprojekt die Frage, wie sich der gegenwärtige Rechtsrahmen zu den sich verändernden Datennutzungsmodellen verhält, insbesondere mit Blick auf die Erbringung von Systemdienstleistungen. In diesem Rahmen wurde zunächst erhoben, welche Daten künftig zur Erbringung von Systemdienstleistungen in einem zunehmend digitalen Netz mit großen Mengen

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

SiNED – Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation

Fördernde Stelle:

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur – Zusätzliche Förderung von Wissenschaft und Technik in Forschung und Lehre aus Mitteln des Niedersächsischen Vorab

Förderkennzeichen:

VWZN3563

Projektlaufzeit:

01.11.2019–31.10.2022 mit Option zur Verlängerung um 2 Jahre

Berichtszeitraum:

01.01.2020–31.12.2020

Projektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

Projektbearbeiter:innen:

Sebastian Buchholz
Alexandra Scheunert



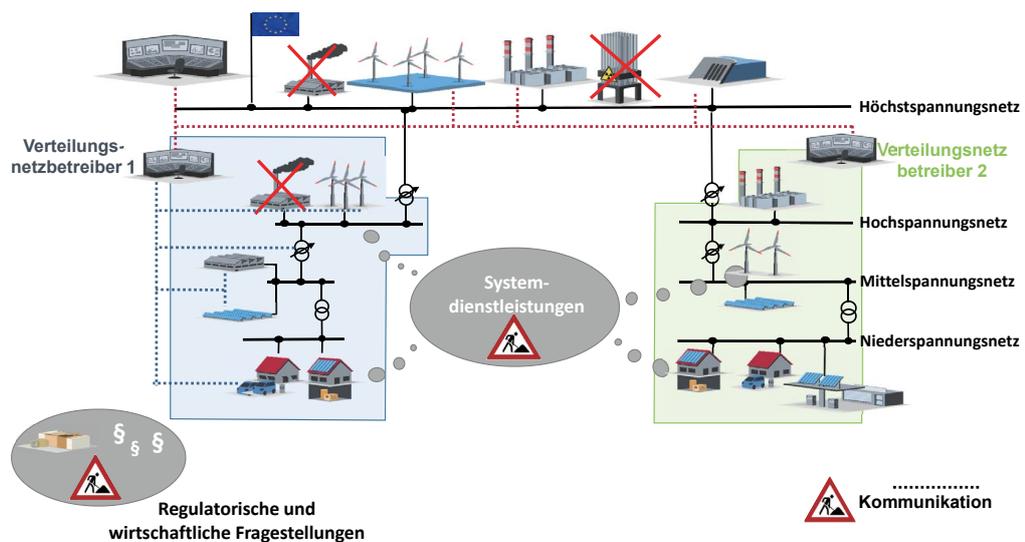
Hartmut Weyer



Sebastian Buchholz



Alexandra Scheunert



dezentraler Einspeisung von welchen Marktteilnehmern benötigt werden. Dabei wurden insbesondere auch von Netzbetreibern benötigte Daten berücksichtigt. Aus dieser Erhebung leiteten sich die weiteren Schwerpunkte der Projektarbeit ab: Neben dem Umgang mit netzbezogenen Daten führen insbesondere neue Marktrollen – allen voran Aggregatoren – zu steigenden Datenbedarfen. Nicht primär den Umfang, sondern die Art der Verarbeitung betreffend, ergeben sich auch durch die angedachte Verwendung von Blockchains in der Stromversorgung erhebliche Veränderungen.

Schwerpunkt des Teilprojekts war sodann die Untersuchung, inwieweit die rechtlichen Vorgaben zu den jeweiligen Datenverarbeitungsvorgängen schon jetzt auf diese Veränderungen ausgelegt sind, und wo ggf. noch Spannungen zwischen der technologischen bzw. wirtschaftlichen Entwicklung und dem Rechtsrahmen bestehen. Hinsichtlich der Verarbeitung von netzbezogenen Daten wurden zunächst europäische Vorgaben zum Umgang mit Daten zum Netzzustand untersucht, um sodann auf nationale Regelungen einzugehen. Neben der Frage, inwieweit dem deutschen Gesetzgeber neben europäischen Vorgaben noch ein eigener Spielraum verbleibt, wurde insbesondere die Reichweite der Regelungen des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) zu Netzzustandsdaten erörtert. Neben dem gesetzgeberischen Ziel, die Datennutzung in dem für den Netzbetrieb notwendigen Umfang zu ermöglichen, spielte schon an dieser Stelle der Schutz von personenbezogenen Daten eine besondere Rolle. Besondere Brisanz erhielt der Umgang mit personenbezogenen Daten bei der Analyse

des Rechtsrahmens für die Datenverarbeitung durch neue Marktrollen wie Aggregatoren. Im Teilprojekt wurde zunächst ein Überblick über mögliche Geschäftsmodelle von Aggregatoren gegeben, um sodann auf Neuerungen durch die Regelungen der Elektrizitätsbinnenmarkt-Richtlinie einzugehen, die darauf abzielen, Aggregatoren den Marktzutritt zu ermöglichen. Zugleich wurden Einschränkungen aus den Vorgaben von Datenschutz-Grundverordnung (DS-GVO) und MsbG erörtert, die u.a. Regelungen enthalten zur Person des Datenverarbeitenden und zur Zweckbindung der Datenverarbeitung. Diese Einschränkungen spielen auch bei der potentiellen Nutzung von Blockchains zur Abwicklung von Verträgen im Stromnetz eine Rolle. Darüber hinaus zeigen sich im Zusammenhang mit Blockchains vor allem dadurch potentielle Spannungen mit dem aktuellen Rechtsrahmen, dass dieser auf die Feststellung eines konkreten Verantwortlichen ausgelegt ist, während Blockchains oftmals gerade auf dem Konzept einer auf alle gleichmäßig verteilten Verantwortung beruhen. Im Energiesektor entschärft sich diese Spannung allerdings dadurch, dass ohnehin in der Regel eine eindeutige Verantwortungszuweisung erforderlich ist, die im Rahmen zulassungsbeschränkter Blockchains auch durchaus umsetzbar ist.

Rechtsrahmen für lastseitige Maßnahmen des Engpassmanagements

Die aufgezeigten Entwicklungen forcieren das Entstehen von Netzengpässen, da die Netze nicht immer ausreichend ausgebaut sind, um den Strom vom Erzeugungsstandort in die

Lastzentren zu transportieren. Netzengpässe stellen eine Gefährdung für die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Elektrizitätsversorgungssystems dar, weswegen es Aufgabe der Netzbetreiber ist, der Entstehung von Netzengpässen vorzubeugen bzw. bestehende Netzengpässe zu beseitigen. Die Bewältigung resultiert jedoch vielfach in zusätzlichen Kosten und kann eine negative Umweltbilanz nach sich ziehen, wenn eine Abregelung von Strom aus erneuerbaren Energien erforderlich wird.

Im gegenwärtigen System bedienen sich Netzbetreiber bei der Bewältigung von Netzengpässen vielfach des Instruments des Redispatch von Erzeugungsanlagen. Hierzu wird in der Regel im Gebiet des Erzeugungsüberschusses „vor“ einem Netzengpass die Stromerzeugung reduziert, während sie im Gebiet des Erzeugungsdefizits „hinter“ dem Netzengpass erhöht wird. Von erheblich geringerer Bedeutung ist die Einbeziehung von Lasten für die Zwecke des Engpassmanagements. Lasten sind grundsätzlich geeignet, unterstützend oder alternativ zum Erzeugungsmanagement zum Einsatz kommen. Insbesondere der Einsatz zuschaltbarer Lasten als Alternative zu einer Abregelung von Stromerzeugungsanlagen wird durch den geltenden Rechtsrahmen restriktiv behandelt. Vor dem Hintergrund einer voranschreitenden Digitalisierung besteht jedoch zunehmend die Möglichkeit, steuernd auf eine Reihe neuer Stromverbraucher wie z.B. Elektromobile oder Wärmepumpen einzuwirken und diese in das System des Engpassmanagements zu integrieren.

Das Arbeitspaket „Rechtsrahmen für lastseitige Maßnahmen des Engpassmanagements“ beschäftigt sich mit der Frage, wie der bestehende Rechtsrahmen weiterentwickelt werden müsste, um eine verstärkte Integration von Lasten im System des Engpassmanagements zu erreichen. Identifiziert wurden insbesondere Herausforderungen bei der Ausgestaltung des Zugriffsrechts der Netzbetreiber. Anders als bei Erzeugungsanlagen gestaltet sich die Kostenberechnung von Stromverbrauchern schwierig, da Einsatzzwecke stark individuell geprägt sind und über die Zeit schwanken können. Kostenbasierte Zugriffsrechte sind insofern weniger geeignet, bislang ungenutzte Potenzi-

ale in diesem Bereich zu heben. Grundsätzlich denkbar ist eine marktbasierete Beschaffung von Flexibilität bspw. über regionale Flexibilitätsmärkte. Hier stellen sich jedoch Herausforderungen, wie mit marktmachtbedingten Preissetzungsspielräumen oder strategischem Bietverhalten der Marktakteure umzugehen ist. In diesem Zusammenhang wird untersucht, ob eine marktbasierete Beschaffung von Lasten in Gestalt eines Hybridmodells in Ergänzung zum kostenbasierten Redispatch von Erzeugungsanlagen treten könnte, um die mit einem solchen Mechanismus verbundenen Risiken einzudämmen. Alternativ hierzu wäre außerdem denkbar, langfristige Zusagemodelle für die Beschaffung von Flexibilität weiterzuentwickeln. Hierbei wird dem Netzbetreiber für einen längerfristigen Zeitraum das Recht eingeräumt, die Anlage bei Bedarf für die Zwecke des Engpassmanagements einzusetzen, wobei dem Anlagenbetreiber für die Zeit der Vereinbarung ein monetärer Anreiz bspw. in Gestalt eines reduzierten Netzentgeltes geboten würde. Ein Beispiel für ein solches Instrument ist die Regelung des § 14a EnWG für die Beschaffung von Flexibilität durch steuerbare Verbrauchseinrichtungen in der Niederspannung.

Literatur

- Wussow, Jonas, Weyer, Hartmut et al.: SiNED-Ancillary Services für Reliable Power Grids in Times of Progressive German Energiewende and Digital Transformation, ETG Kongress 18.–19. Mai 2021, ETG-Fachberichte, 148–153.
- Buchholz, Sebastian, Weyer, Hartmut et al.: A Sketch of Unwanted Gaming Strategies in Flexibility Provision for the Energy System, WI 2021 Community Workshop Proceedings – Energy Informatics and Electro Mobility ICT, 33–39.
- Gerlach, Jana, Breitner, Michael, Scheunert, Alexandra und Weyer Hartmut: Datenschutz und Privatsphäre in smarten Stromnetzen: eine interdisziplinäre Analyse und Trends, WI 2021 Community Workshop Proceedings – Energy Informatics and Electro Mobility ICT, 47–53.

Re3dOx – Recycling und Ressourceneffizienz bei der RedOx-Flow-Batterie

Kurzfassung

Um das Ziel der fast vollständigen Treibhausgasneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts zu erreichen, nimmt der Klimaschutzplan 2050 einen hohen Stellenwert ein. Ein primäres Ziel stellt darin die Bereitstellung und Zwischenspeicherung von erneuerbaren Energien dar, um so die CO₂-Emissionen signifikant und nachhaltig zu senken. Die Problematik bei erneuerbaren Energien, wie der Windenergie aus Photovoltaikanlagen, ist die fluktuierende Einspeisung. Folglich sind effiziente und sichere stationäre Speicher für eine erfolgreiche Energiewende von hoher Wichtigkeit. Vielversprechend sind die Flow-Batterien (FB) und hier insbesondere die Vanadium-Flow-Batterien (VFB) [1, 2]. In dem Projekt werden die ökologischen sowie ökonomische Auswirkungen von Recycling der Batteriekomponenten untersucht, welche ergänzend durch Zellversuche validiert werden.

Abstract

In pursuing the goal of almost full greenhouse gas neutrality by the middle of the century, the Climate Protection Plan 2050 has a high priority. A primary goal is the provision and intermediate storage of renewable energies in achieving a significant and sustainable reduction in CO₂ emissions. The problem with renewable energies, such as wind energy or photovoltaic systems, is the fluctuating input. Consequently, efficient and safe stationary storage is of high importance for a successful energy transition. Flow batteries (FB) and especially vanadium flow batteries (VFB) are one of the promising, safe and sustainable technologies [1, 2]. In the project, the environmental as well as economic

impacts of recycling are being investigated, which are validated by cell testing.

Gesamtziel des Vorhabens

Die VFB kann als Zwischenspeicher für elektrische Energie einen erheblichen Anteil an der Reduzierung von CO₂-Emissionen haben. Neben dem Elektrolyten hat der Stack einen besonders hohen Anteil an den Emissionen der Batterie [2]. Insbesondere die Membran und die Bipolarplatte (BPP) weisen aufgrund des Materialeinsatzes und der Fertigungsverluste ein besonders hohes Potenzial auf, zumal in industriellen VFB noch kein Rezyklat für diese Komponenten verwendet wird. Der Fokus des Projektes ist somit das Recyclen dieser Komponenten und damit einhergehend die Quantifizierung der vermiedenen Emissionen sowie die Kosteneinsparungen. Bei der Verwendung von recycelten Materialien muss sichergestellt werden, dass die Materialeigenschaften und die Performance nicht negativ verändert werden. Ein entscheidender Parameter ist der Innenwiderstand, welcher hier mittels Zelltests mit Standard-Komponenten verglichen wird. Weitere Tests sowie die eigentliche Herstellung werden von den Projektpartnern durchgeführt. Die Verwendung von Rezyklat in der VFB führt vermutlich zu einer deutlichen Reduktion von Emissionen und verwendeten Ressourcen. Somit kann die Batterie zu einem noch größeren Anteil zur erfolgreichen Energiewende beitragen, als ohnehin vermutet wird.

Kosten und Nachhaltigkeit

Voraussetzung für die Betrachtung der Kosten und der Nachhaltigkeit war die Entwicklung von Massen- und Energiebilanzen für eine VFB mit einer Nennleistung von 1 MW und 8 MWh Nennkapazität. Als methodische Ansätze fungieren das Life Cycle Costing (LCC) und Life Cycle Assessment (LCA). Basierend auf den Bilanzen wurde ein Systemmodell über den gesamten Lebenszyklus in der Software Umberto aufgebaut, anhand dieses Modells können Szenarien basierend auf verschiedenen End-of-Life-Möglichkeiten analysiert werden. Mit Hilfe des Modells können aber auch alternative Herstellungsrouten

Projektpartner

- Centroplast Engineering Plastics GmbH
- Eisenhuth GmbH & Co. KG
- Enerox GmbH
- FUMATECH BWT GmbH
- ZBT – Zentrum für Brennstoffzellen-Technik GmbH

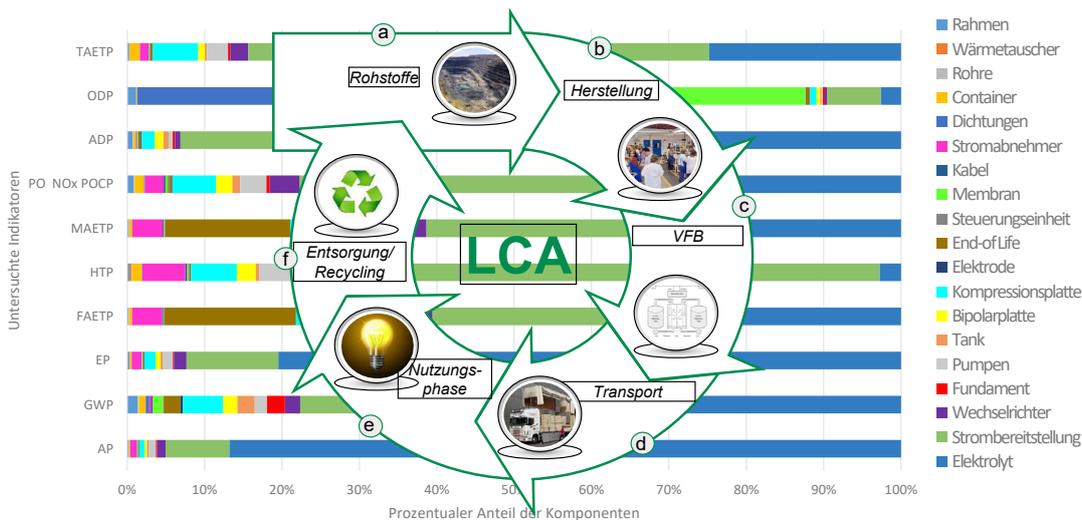


Abbildung 1: Emissionen der VFB in Kombination mit einem klassischen Lebenszyklus einer VFB. Folgende Indikatoren wurden untersucht: AP (Versauerungspotenzial), EP (Eutrophierungspotenzial), PO (photochemische Oxidation), ADP (abiotisches Ressourcenabbaupotenzial), GWP (Treibhauspotenzial), ODP (stratosphärisches Ozonabbaupotenzial), TAETP (terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial), FAETP (aquatisches Süßwasserökotoxizitätspotenzial), HTP (Humantoxizitätspotenzial), MAETP (aquatisches Meeresökotoxizitätspotenzial).

ten oder andere Parameter in anderen Lebenszyklusphasen analysiert werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Ziele sind die Bewertung von Potenzialen des open- sowie des closed-loop-Recyclings. Mit Hilfe des Modells können

perspektivisch verschiedene Recyclingpfade bewertet werden, die internen Ergebnisse oder auch die Ergebnisse der Projektpartner können aber auch in dem Modell berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 1 dargestellt, können so für verschiedene Wirkungsindikatoren die prozentualen, aber auch die absoluten Emissionen errechnet werden.

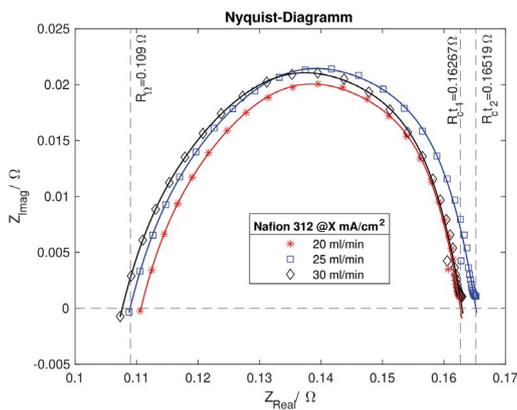


Abbildung 2: Das Nyquist-Diagramm zeigt die Ergebnisse der Impedanzmessung einer VFB-Zelle bei unterschiedlichen Volumenströmen durch die Zelle. Auf den Achsen ist jeweils der Real- und Imaginärteil der Impedanz aufgetragen, die als Ergebnis des Abgleichs von Stromimpuls und Spannungsantwort des Systems bestimmt werden können. Der Durchtritt der angepassten Linien (durchgezogene farbige Linien) durch die X-Achse bei dem Wert null markiert den ohmschen Widerstand (links) und kinetischen Widerstand der Zelle (rechts).

Zellcharakterisierung

Auch wenn mit dem Recycling der Materialien Kapital und Rohstoffe eingespart werden können, sollten die recycelten Bestandteile der Zelle keine großen Abweichungen in Bezug auf Performance gegenüber neu eingesetzten Materialien aufweisen. Wesentliche Einflussgrößen der Zellperformance sind die Widerstände von Membran und BPP sowie Permeabilität des Separators in Bezug auf das Vanadium und die Protonen. Diese Einflussgrößen werden mithilfe von festgelegten Messroutinen untersucht und der Einfluss des Recycling-Prozesses auf die Performance analysiert. Eine gängige Methode die Widerstände von Membran und BPP zu testen, ist die sogenannte Impedanzmessung. Bei dieser Messmethode wird die Zelle einem überlagertem Stromsignal aus Wechsel- und Konstantstrom ausgesetzt und die Spannungsantwort des Systems auf diese Anregung untersucht. Aus diesen Signalen kann eine Impedanz

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Re3dOx – Recycling und Ressourceneffizienz bei der RedOx-Flow-Batterie

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für
Wirtschaft und Energie

Förderkennzeichen:

03ET6156F

Laufzeit

01.09.2019–31.08.2022

Projektleiter:innen:

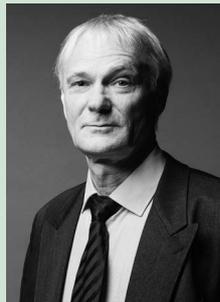
Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kunz
Dr.-Ing. Maik Becker
Dr.-Ing. Christine Minke MBA

Projektbearbeiter:

Alexander Kubicka, M.Sc.
Nick Blume, M.Sc.



Thomas Turek



Ulrich Kunz



Maik Becker



Christine Minke

(der dynamische Widerstand) der Zelle abgeleitet werden. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse einer Impedanzmessung an der Vollzelle dargestellt. Zur Vergleichbarkeit werden während des Versuchsplans nur einzelne Bestandteile der Zelle ausgetauscht und die erhaltenen Ergebnisse mit Referenzmaterialien verglichen. Bei der Referenz handelt es sich um jeweils neue und ungebrauchte Materialien, die auf die gleiche Weise wie oben beschrieben charakterisiert werden. Durch diese Messungen lässt sich eine Aussage über eine mögliche Veränderung der Innenwiderstände und somit eine Leistungsänderung der gebrauchten und recycelten Materialien im Vergleich zu neu eingesetzten Zellbestandteilen treffen. Das Best-Case-Szenario ist in diesem Fall, wenn die getesteten Membranen und BPP nur geringe oder keine Abweichung zur Referenz aufweisen.

Literatur

- [1] Minke, C., U. Kunz und T. Turek: *Journal of Power Sources* 2017, 361, 105–114. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.06.066.
- [2] Weber, S., J. F. Peters, M. Baumann und M. Weil: *Environmental science & technology* 2018, 52 (18), 10864–10873. DOI: 10.1021/acs.est.8b02073.

Polymerelektrolytmembranen (PEM) für Vanadium-Redox-Flow-Batterien

Kurzfassung

Ziel des Verbundprojektes „Polymerelektrolytmembranen (PEM) für Vanadium-Redox-Flow-Batterien“ ist die Entwicklung einer verbesserten und kostengünstigeren PEM für Vanadium-Redox-Flow-Batterien durch strahlungsinduzierte Pfropfcopolymerisation funktionaler Monomere auf fluorierten Grundmaterialien. Ebenso ist ein Ziel, ein grundlegendes Verständnis der Polymer-Prozess-Struktur-Eigenschafts-Korrelation zu gewinnen. Daraus ergeben sich gezielte individuelle Synthesen für PEM, die den entsprechenden gewünschten Eigenschaften und/oder Betriebsbedingungen, wie Langzeitstabilität, mechanische Stabilität, elektrischer Widerstand, Crossover und Handhabung, angepasst werden können.

Abstract

The aim of the project "Polymer Electrolyte Membranes (PEM) for Vanadium Redox Flow Batteries" is to synthesize an improved and more cost-effective PEM for vanadium-redox-flow batteries by radiation-induced graft copolymerization of functional monomers on fluorinated base materials. Similarly, one goal is to gain a fundamental understanding of polymer-

process-structure-property correlation. This will lead to targeted individual syntheses for PEMs that can be adapted to the desired properties and/or the corresponding operating conditions, such as long-term stability, mechanical stability, electrical resistance, crossover and handling.

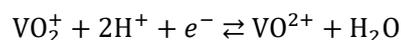
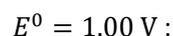
Projekthintergrund

Die weltweite Umstellung von fossilen Brennstoffen auf erneuerbare Energien erfordert Energiespeichersysteme, die die unregelmäßige Energieerzeugung der erneuerbaren Energiequellen ausgleichen [1]. Die Grundlage für die mittelfristige Speicherung sind elektrochemische Speicher. Hierfür ist die Vanadium-Redox-Flow-Batterie (VFB) ein vielversprechendes Energiespeichersystem zur Speicherung potenziell großer Energiemengen. Der Einsatzbereich besteht in der stationären Kurz- und Langzeitspeicherung von elektrischer Energie, dabei hat eine VFB eine lange Lebensdauer [1, 2]. Die Energie in einer VFB wird durch gelöste Vanadiumredoxpaare gespeichert. Grundsätzlich besteht eine VFB aus zwei Halbzellen, die durch eine Polymerelektrolytmembran (PEM) getrennt sind. Während der Entladung und Aufladung der VFB finden die Redoxreaktionen (1) und (2) zwischen V^{2+}/V^{3+} und VO_2^+/VO_2 an den jeweiligen negativen und positiven Elektroden statt [3].

Negative Elektrode (1)



positive Elektrode (2)



Obwohl VFB derzeit kommerziell verfügbar sind, sind weitere Verbesserungen erforderlich, um die Batterieleistung zu erhöhen. Dabei hat die Membran einen bedeutsamen Einfluss auf die Leistung und die Batteriekosten [2, 4].

Projektpartner

- Sabine Beuermann, Marco Drache, Maria Stehle, Institut für Technische Chemie, TU Clausthal – Durchführung radikalischer Pfropfcopolymerisation zur Herstellung von Protonenaustauschermembranen
- Uwe Gohs, Mohsen S. Bogar, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden – Durchführung der Bestrahlung von ETFE-Folien zur Erzeugung von Radikalen und theoretische Beschreibung der Radikalbildungsvorgänge

Die Aufgabe der Membran besteht darin, die reaktiven Vanadiumspezies zu trennen und die Protonenleitfähigkeit zwischen den Halbzellen zu ermöglichen. Typische Separatoren sind Ionenaustauschermembranen. Unter den Ionenaustauschermembranen werden je nach Art der verwendeten ionischen Funktionsgruppen zwischen der Kationenaustauschermembran, der Anionenaustauschermembran sowie der amphoteren Ionenaustauschermembran unterschieden. Eine häufig verwendete und untersuchte Membran ist die Kationenaustauschermembran. Die meisten Kationenaustauschermembranen weisen jedoch eine schlechte Ionenselektivität auf [5]. Kationenaustauschermembranen leiten sowohl andere Kationen als auch Protonen. Demnach werden Vanadiumionen durch die Membran transportiert, was als Vanadium-Crossover bezeichnet wird. Die Folgen sind Selbstentladungsreaktionen und ein Ungleichgewicht der Vanadiumkonzentrationen sowie Tankvolumina zwischen der positiven und der negativen Seite, was zu niedrigen Wirkungsgraden und Kapazitätsverlusten führt [6]. Obwohl Kationenaustauschermembranen in technischen Anwendungen genutzt werden, weisen diese Membranen verschiedene Nachteile auf, sodass die Entwicklung von neuen Membranen mit verbesserten Eigenschaften erforderlich ist. Es werden zwei Ansätze verfolgt: (1) Optimierung von Nafion, (2) Ersatz von Nafion durch andere Polymersysteme.

Projektziele

Das Hauptziel des Projekts ist die Synthese verbesserter PEM für VFB durch strahlungsinduzierte Pfcopolymerisation funktionaler Monomere auf fluorierten Grundmaterialien. Hauptanforderungen an die PEM sind eine hohe Protonenleitfähigkeit und ein geringer Vanadium-Crossover in Verbindung mit guten mechanischen Eigenschaften und chemischer Resistenz. Ebenso ist ein grundlegendes Verständnis der Polymer-Prozess-Struktur-Eigenschafts-Korrelation unerlässlich. Daraus ergeben sich für das Projekt die folgenden wichtigen Teilziele:

- Ein vertieftes Verständnis des Radikalbildungsprozesses (Radikalart, Radikaldichte) soll mittels ESR-Spektroskopie erlangt werden. Es soll eine Korrelation zwischen der Art und Dichte der gebildeten Radikale und der Pfcopolymerisation (u.a. Geschwindigkeit, Pfcopolymerisationsgrad, Sulfonierbarkeit) erarbeitet werden.
- Für das Erreichen einer hohen Spannungseffizienz in der VFB ist durch die gepfropften Monomeren eine hohe Funktionsdichte protogener Gruppen einzubringen. Die PEM muss in der VFB langzeitstabil sein und gute mechanische Eigenschaften besitzen.
- Die Effizienz der VFB wird wesentlich durch den Vanadium-Crossover reduziert. Aus diesem Grund müssen die PEM den Transport

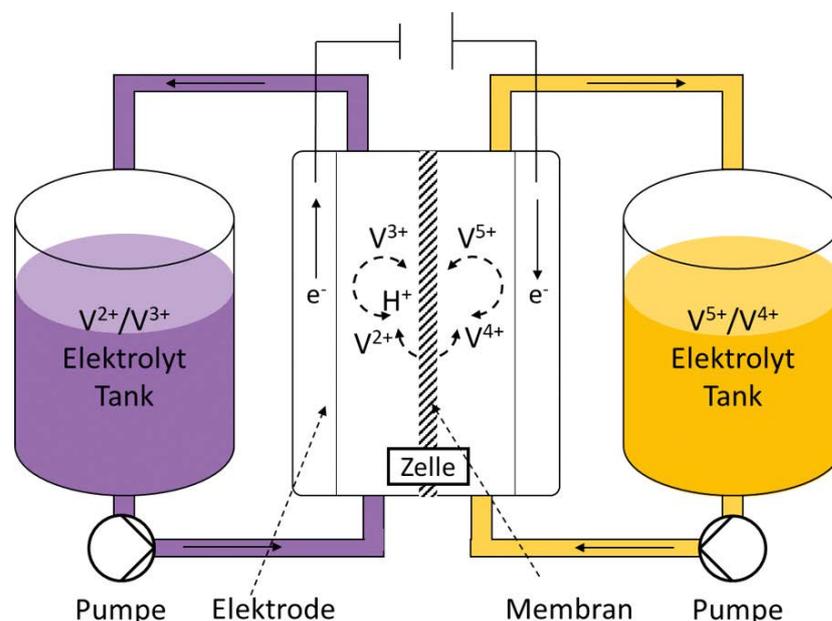


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie und typische Komponenten.

positiv geladener Vanadium-Ionen aktiv blockieren. Diese Funktionalität soll durch die verwendeten strukturgebenden Grundmaterialien (z.B. Vernetzung) und die gepfropften Polymere in die PEM eingebunden werden.

Die Erreichung des Projektziels soll durch die direkte Prüfung der PEM in der VFB nachgewiesen werden. Hierfür werden die Protonenleitfähigkeit durch Polarisationskurven sowie die Spannungs- und Coulomb-Effizienz mit Zyklisierungsexperimenten bestimmt. Durch In-situ-Messung des Vanadium-Crossovers soll der Stofftransport unter realen Betriebsbedingungen der VFB quantifiziert werden. Zur Bewertung der Konkurrenzfähigkeit hergestellter Membranen wird ein Vergleich zwischen den neuen Membranen mit Nafion- und Fumasep-Membranen durchgeführt, welche zur Zeit als technischer Standard anzusehen sind.

Die Ziele werden an unterschiedlichen Instituten bearbeitet. Das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden beschäftigt sich mit den oben aufgeführten Radikalbildungsprozessen. Darüber hinaus bildet das Institut für Technische Chemie der TU Clausthal die Kernkompetenz der Synthese von PEM ab und bearbeitet innerhalb dieses Projektes die Synthese. Ferner wird durch die Synthese das grundlegende Verständnis der Polymer-Prozess-Struktur-Eigenschaften erweitert, um zukünftige angepasste PEM für individuelle Betriebsbedingungen zu synthetisieren.

Das Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik der TU Clausthal beschäftigt sich vor allem mit der elektrochemischen Charakterisierung der PEM, wobei der Fokus auf die wichtigsten Bereiche der elektrochemischen Eigenschaften gelegt wird. Ein besonderes Merkmal ist, dass alle Parameter aus einem Zellaufbau gewonnen werden können und keine dritten Aufbauten nötig sind. Dabei werden die Vergleichbarkeit und die Charakterisierungsgeschwindigkeit erhöht. Ferner soll innerhalb des Projektes eine Charakterisierungsroutine entwickelt werden, um Zeit- und kosteneffizient an Vergleichsparameter zu gelangen. Zuerst soll ein Versuchsstand zur parallelen Membranbewertung gestaltet werden. Darauf aufbauend können im Anschluss Untersuchungen zum Vanadium-Crossover bei variierender Elektrolytkonzentration durchgeführt werden. Ein weiterer Punkt ist die Vergleichbarkeit von neuen PEM-Materialien zu bekanntem Standardmaterial. Hierzu

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Polymerelektrolytmembranen (PEM) als alternative Separatoren für Vanadium-Redox-Flow-Batterien

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Förderkennzeichen:

03ET6156F

Laufzeit

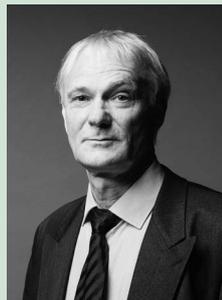
01.06.2019–31.05.2022

ProjektleiterInnen:

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kunz

Projektbearbeiter:

Torben Lemmermann



Ulrich Kunz



Torben Lemmermann

werden die gewonnenen Parameter in Relation gesetzt. Zum Abschluss wird die Membran auf ihre Stabilität sowie ihre elektrochemische Performance bewertet. Hier ist außerdem der Aspekt aufzugreifen, dass die Ermittlung von Leitlinien für den optimalen VFB-Betrieb mit den aussichtsreichsten Membranen durchzuführen ist.

Am Ende des Projekts soll ebenso zu den oben genannten Zielen ein grundlegendes Verständnis der Transportprozesse innerhalb der VFB vorliegen, um zum einen effektiv die Polymer-Prozess-Struktur anzupassen und zum anderen den Vanadium-Crossover zu minimieren.

Literaturverzeichnis

1. Sterner, M. und I. Stadler: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
2. Minke, C. und M. A. Dorantes Ledesma: Impact of cell design and maintenance strategy on life cycle costs of vanadium redox flow batteries. *Journal of Energy Storage* 21, 2019, 571–580. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.12.019> .
3. Choi, C., Y. Choi, S. Kim et al.: Resistor Design for the Use of Dynamic Hydrogen Electrode in Vanadium Redox Flow Batteries. *Electrochimica Acta* 213, 2016, 490–495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.07.152> .
4. Becker, M., N. Bredemeyer, N. Tenhumberg et al.: Polarization curve measurements combined with potential probe sensing for determining current density distribution in vanadium redox-flow batteries. *Journal of Power Sources* 307, 2016, 826–833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.011> .
5. Dürkop, D., H. Widedecke, C. Schilde et al.: Polymer Membranes for All-Vanadium Redox Flow Batteries: A Review. *Membranes (Basel)* 11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes11030214> .
6. Schafner, K., M. Becker und T. Turek: Capabalanancing for vanadium redox flow batteries through continuous and dynamic electrolyte overflow. *J Appl Electrochem* 51, 2021, 1217–1228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-021-01572-y> .

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 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, der Umweltverträglichkeit und der sicherheitstechnischen Eigenschaften auf

und gilt als ein aussichtsreiches Material für zukünftige wiederaufladbare Batterien.

In diesem Bericht wird auf die Herausforderungen bei dem Betrieb einer elektrisch wiederaufladbaren Zink-Luft-Batterie eingegangen und es werden Maßnahmen aufgezeigt, um diese zu bewältigen. Weiterhin wird ein Konzept für eine 5 W-Laborzelle vorgestellt, das wichtige Kriterien wie gute Zelldurchströmung und kompakte Bauweise beinhaltet. Im Anschluss wird das Batterieverhalten während einer Zyklisierung über einen Zeitraum von mehr als 300 h beschrieben und diskutiert.

Projektpartner

- Dr. Martin Krebs, Dr. Jerry Bamfo Asante, Dr. Nicolas Bucher, VARTA Microbattery GmbH, Leitung des Konsortiums und Elektrodentests in Knopfzellen
- Dr. Thorsten Hickmann, Björn Dörge, Eisenhuth GmbH & Co. KG, Gehäuse- und Dichtungskonzept
- Dr. Jürgen Kintrup, Dr. Andreas Bulan, Covestro Deutschland AG, Katalysatorzusammensetzung auf der bifunktionalen Gasdiffusionselektrode (GDE)
- Dr. Alexander Tillmann, 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

Abstract

According to the decision by the German federal government for the reduction of 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 will become more important in the future. Therefore, the demand for elements such as lithium and vanadium will increase steadily. Due to a high availability and environmental friendliness, zinc has promising properties and a high potential as anode material in rechargeable batteries.

The report discusses the challenges of operating an electrically rechargeable zinc-air battery and identifies measures to overcome these. Furthermore, the concept of a 5 W laboratory battery is presented, which includes important criteria such as good permeability and a compact design. Subsequently the battery behaviour during the cyclisation over a period of more than 300 h is described and discussed.

Projekthintergrund

Durch den Beschluss der Bundesrepublik Deutschland, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2030 um 55 Prozent gegenüber 1990 zu verringern, wurde ein Umdenken der der-

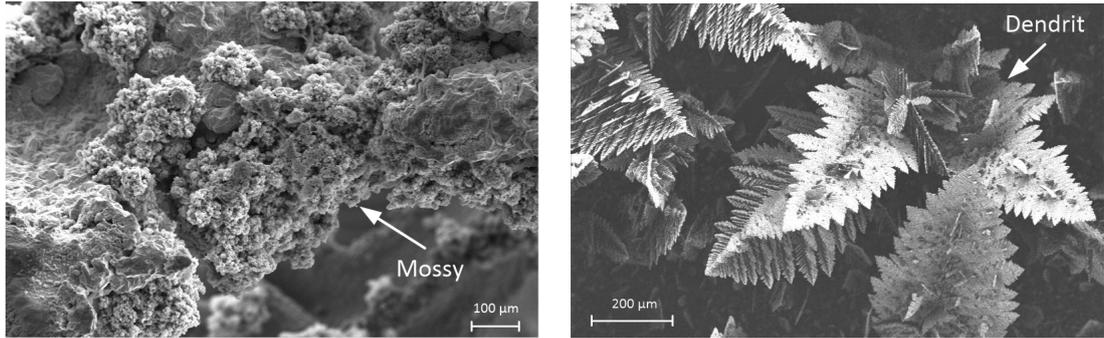


Abbildung 1: Mit einem Rasterelektronenmikroskop aufgenommene Mossy-Strukturen (links) und Dendriten (rechts), die sich auf einer Zinkelektrode während des Ladevorgangs ausbilden können.

zeitigen 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 weiter 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 kann unter anderem aufgrund der Bildung von Dendriten und unerwünschten „Mossy“-Strukturen an der Zinkelektrode während des Ladevorgangs beeinträchtigt werden. Aufnahmen zu den Zinkstrukturen wurden unter einem Rasterelektronenmikroskop angefertigt und sind in der Abbildung 1 dargestellt.

Erfolgt die Zinkabscheidung in Form von Mossy-Strukturen, kann es vor allem bei porösen Elektroden dazu führen, dass die Poren verblocken und der positive Effekt der guten Durchströmbarkeit herabgesetzt wird. Die Bildung von Dendriten kann durch das Hindurchtreten durch den Separator auf die Kathodenseite sogar dazu führen, dass ein interner Kurzschluss entsteht.

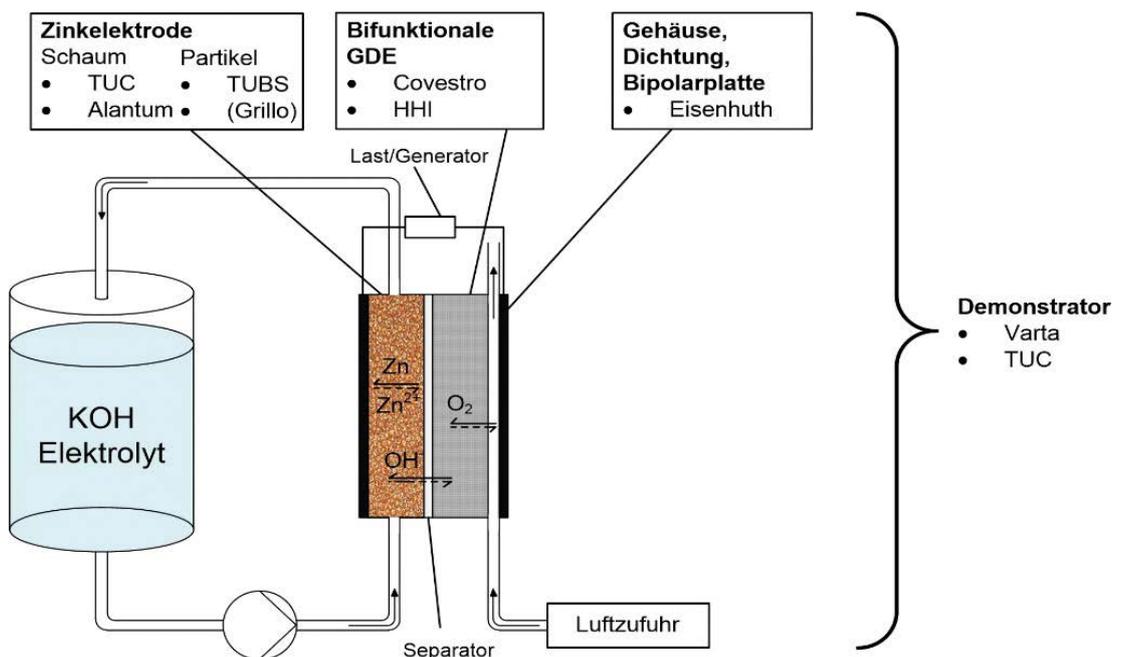


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer elektrisch wieder aufladbaren Zink-Luft-Batterie und Überblick zu den Aufgabenbereichen im Projektkonsortium.

Mit dem in den folgenden Abschnitten beschriebenen Batteriekonzept soll ein Weg gefunden werden, um den beschriebenen Phänomenen entgegen zu wirken. Der Anspruch an die neuartigen Batterie ist, dass bei einem kompakten Aufbau gleichzeitig eine gute Durchströmung und somit eine gute Elektrolytverteilung gewährleistet werden kann.

Funktionsweise

Eine schematische Darstellung des Zellkonzepts einer elektrisch wieder aufladbaren Zink-Luft-Batterie und der damit verbundenen Aufgabebereiche innerhalb des Projektvorhabens ZiLsicher ist in der Abbildung 2 dargestellt.

Die Batterie wird mit einem alkalischen Elektrolyten bestehend aus 30 Gew.-% KOH und 2 Gew.-% ZnO durchströmt. Anschließend wird der austretende Elektrolyt in einem externen Tank mit der übrigen Elektrolytmenge vermischt und der Batterie wieder zugeführt. Die permanente Durchströmung der Batterie sorgt für einen ständigen Austausch der Grenzschichten mit neuen Ladungsträgern und unterstützt damit den Stofftransport. Das trägt dazu bei, dass unerwünschte Zinkstrukturen während des Ladevorgangs reduziert werden können [3]. Weiterhin hat der bewegte Elektrolyt einen positiven Einfluss auf die Ausbildung von Passivschichten während des Entladens [4]. Eine poröse Anodenstruktur in Form eines Metallschaums begünstigt die Verteilung des Elektrolyten und soll zu einer gleichmäßigen Zinkabscheidung führen. Das Material wird von der Fa. Alantum GmbH in einer breiten Porengrößenvariation zur Verfügung gestellt. Auf dem Metallschaum folgend ist ein Separator notwendig, um den direkten Kontakt der Elektroden zu verhindern. Als Kathodenmaterial soll eine bifunktionale Gasdiffusionselektrode (GDE) eingesetzt werden, die noch nicht kommerziell erhältlich ist und einen Forschungsschwerpunkt in dem Projekt darstellt. Die enthaltenen Katalysatoren sind Silber und Cobaltoxid, die zusammen mit einem Binder (Polytetrafluorethylen) als Dispersion auf einem Metallgewebe aufgewalzt werden. Die Fertigung übernimmt die Covestro AG in dem Projekt. Eine anschließende Oberflächenstrukturierung mittels Ultrakurzlaserverfahren kann vom Fraunhofer HHI vorgenommen werden. Zeitgleich zu den Laborversuchen mit Batteriezellen aus hauseigener Fertigung beschäftigt sich der Projektpartner Fa. Eisenhuth GmbH mit der Hochskalierung der Batterie. Weiterhin unter-

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:

01.01.2019–30.06.2022

Projektleiter:

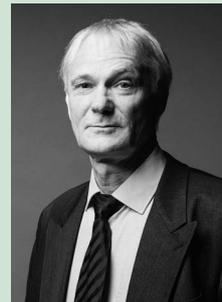
Prof. Thomas Turek
Prof. Ulrich Kunz

Projektbearbeiter:

Sascha Genthe, M.Sc.



Thomas Turek



Ulrich Kunz



Sascha Genthe

nimmt das Unternehmen Versuche bezüglich der Materialstabilität (Dichtungen, Zellrahmen etc.) in einem stark alkalischen Milieu. Neben den Tests in einer durchflossenen Batterie werden von der VARTA Microbattery GmbH zusätzliche Knopfzellentests mit den zu untersuchenden Materialien vorgenommen.

Projektziele

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. Die Batterie soll über 1000 Zyklen geladen und wieder entladen werden und dabei eine niedrigere Alterung aufweisen. Als Zwischenschritte sind Untersuchungen mit kleineren Ausführungen mit 10 W und 5 W Leistung notwendig, um das Zellkonzept zu testen und die optimalen Betriebsparameter herauszuarbeiten. Weiterhin sind Versuche zu den Einzelkomponenten, wie Elektroden- und Separatormaterialien, ein wichtiger Bestandteil des Projekts, um ein optimales Ergebnis mit dem Demonstrator erzielen zu können.

Projektergebnisse

Die Versuchsergebnisse wurden mit einer haus-eigenen Laborbatterie mit einer Leistung von 5 W erzielt. Das Ziel des Versuchs war eine hohe Langzeitstabilität. Weiterhin sollte der Versuch Hinweise bezüglich der Alterung der Einzelkomponenten liefern. Eine fotografische Darstellung der Batterie zeigt die Abbildung 3.

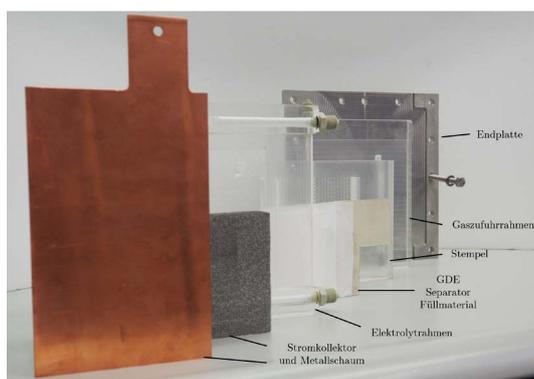


Abbildung 3: Fotografische Darstellung der Einzelkomponenten der 5 W-Laborzelle.

Die geometrische Aktivfläche der Batterie beträgt 100 cm². Als Anodensubstrat wurde ein Metallschaum aus Kupfer mit einer mittleren Porengröße von 1200 µm verwendet. Aufgrund der Tatsache, dass zum Zeitpunkt des Versuches noch keine bifunktionale GDE zur Verfügung stand, wurde auf eine silberbasierte GDE der Covestro AG zurückgegriffen. Als Separatormaterial diente ein Material mit der Produktbezeichnung Celgard 5550. Das verwendete Füllmaterial war ein Baumwollvlies und diente als Platzhalter, um einen kompakten Aufbau zu gewährleisten. Endplatten aus Edelstahl wurden verwendet, um die Batterie und die darin befindlichen Einzelkomponenten darin zu fixieren.

Die Zelle wurde mit einer effektiven Stromdichte von 50 mA cm⁻² bei einer Pulsdauer von 1 s und einer Pulspause von 2 s betrieben. Die Entladegrenze wurde auf 0,8 V festgesetzt, sodass ein zu starkes Absinken des Potentials und eine mögliche Oxidation des Metallschaums vermieden werden konnte. Eine obere Ladegrenze von 3,0 V wurde ebenfalls in der Prozedur vordefiniert, wurde aber während des Versuchs nicht erreicht. Das aufgenommene Zellpotential des gesamten Versuchszeitraum ist in Abbildung 4 dargestellt.

Insgesamt konnten während der Versuchsdurchführung mit der 5 W Laborzelle 297 Zyklen erreicht werden. Aufgrund der Aneinanderreihung der Zyklen und der Zyklendauer von durchschnittlich 1,5 h erscheint die Darstellung in dem linken Diagramm der Abbildung 4 als ein ausgefüllter Balken. Deshalb ist eine Detailansicht für den Versuchszeitraum zwischen 250 h und 280 h in dem rechten Diagramm wiedergegeben. Die Versuchsdurchführung ist in die **Phasen I - III** eingeteilt.

Während des Ladevorgangs in der **Phase I** wurden Potentiale von bis zu 2,8 V erreicht, was vermutlich auf ein Gaspolster zwischen dem Separator und der GDE zurückzuführen ist. In der anschließenden **Phase II** lag das Zell-ladepotential deutlich niedriger bei ca. 1,8 V. Das maximale Ladepotential änderte sich nur wenige Millivolt bis zum Shutdown, der durch eine rote vertikale Linie im linken Diagramm gekennzeichnet ist. Hierbei handelt es sich um eine Unterbrechung des Versuchs. Der Grund war eine erhöhte Elektrolytpenetration durch die GDE hindurch in den Gasraum. Das führte dazu, dass der Elektrolyttank keine Flüssigkeit mehr enthielt. Mit dem wiederholten Anfahren der Zelle startete die **Phase III** des Versuchs.

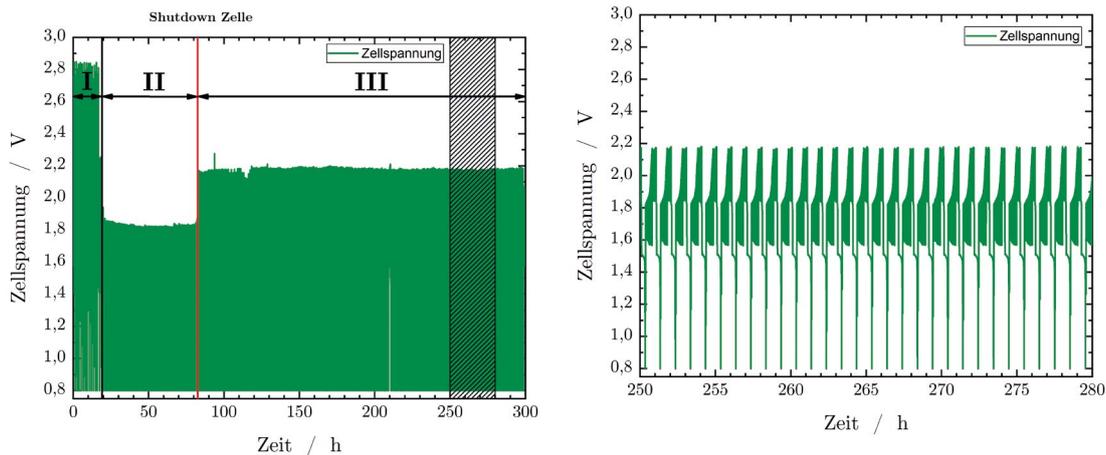


Abbildung 4: Lade- und Entladekurven aus dem Langzeitversuch der 5 W-Vollzelle, die mit einer GDE auf Silberbasis betrieben wurde. Darstellung des gesamten Versuchszeitraums mit einer Unterteilung in drei Versuchsphasen (links) und Detailansicht für den Versuchsabschnitt zwischen 250 h und 280 h (rechts) (dargestellt durch ein schraffiertes Rechteck im linken Diagramm).

Auffällig ist in dieser Versuchsphase die Stabilisierung des Zellpotentials auf ca. 2,2 V, das weitestgehend bis zum Versuchsende konstant blieb. Weiterhin konnte der Durchtritt des Elektrolyten durch die GDE reduziert werden, wobei die Ursache für die anfänglich hohe Elektrolytpenetration und der dann folgenden Reduktion in der Phase III noch ungeklärt ist.

Zusammenfassung

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass mit dem neuen Zellkonzept grundsätzlich eine zyklens stabile Batterie mit den verwendeten Komponenten realisiert werden kann. Dennoch sind weitere Verbesserungen notwendig, da nachfolgenden Untersuchungen ergeben haben, dass die gewünschte Sauerstoffreduktion während des Entladens nicht in jedem Zyklus vollständig ausgeprägt war. Neuere Ergebnisse zeigen, dass die Schaumkontaktierung und das vollständige Anpressen der Komponenten bis hin zu einer „abstandsfreien Zellengeometrie“ entscheidend für eine optimale Batteriefunktion sind.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt, Klimaschutzziele Deutschlands. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimaschutzziele-deutschlands> (Zuletzt aufgerufen am September 27, 2021).
- [2] Stahl, H., D. Bauknecht, A. Hermann, W. Jenseit, A. Köhler, C. Merz, M. Möller, D. Schüler und M. Vogel: Ableitung von Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern 2016.
- [3] Riede, J.-C., T. Turek und U. Kunz: *Electrochimica Acta* 2018, 269, 217–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.110>.
- [4] Bockelmann, M., M. Becker, L. Reining, U. Kunz und T. Turek: *J. Electrochem. Soc.* 2019, 166 (6), A1132–A1139. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.0791906jes>.

StaR – Stack Revolution

Kurzfassung

Das Projekt Stack Revolution ist ein vom BMBF geförderter Verbund aus Wissenschaft und Industrie mit dem Ziel der Entwicklung eines besonders kostengünstigen Stacks (Zellenstapel) für die alkalische Wasserelektrolyse. Koordiniert wird das Projekt vom Start-Up WEW aus Dortmund, dessen Gründer viele Jahre Industrieerfahrung in Führungspositionen und umfangreiches Know-how auf dem Gebiet der elektrochemischen Prozesse einbringen. Das Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik und das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal sind als Forschungspartner im Projekt verantwortlich für die Charakterisierung und Weiterentwicklung von Elektroden sowie das modellgestützte Design von Zellen und Stacks. Die RWTH Aachen untersucht geeignete Fügeverfahren für die Fertigung der Stacks, während die OTH Regensburg den Produktionsablauf im Gigawatt-Maßstab plant und einen digitalen Zwilling für den Produktionshochlauf entwickelt. Als Bindeglied zwischen der Stack-Entwicklung und dem Aufbau einer Serienproduktion wird das Forschungsvorhaben durch die Hochschule Rhein-Waal vervollständigt, die sich mit Marktprognosen und Fragen des Supply-Chain-Managements beschäftigt. Gemeinsam mit dem assoziierten Partner TU Dortmund entwickelt die HSRW zudem ein Kostenmodell zur Bewertung der Herstellungskosten.

Abstract

The Stack Revolution project is a collaboration between science and industry with the aim of developing a particularly cost-effective cell stack for alkaline water electrolysis funded by BMBF. The project is coordinated by the start-up WEW from Dortmund, whose founders contribute many years of industrial experience in management positions and extensive know-how in the field of electrochemical processes. The Institute of Chemical and Electrochemical Process Engineering and the Research Center Energy Storage Technologies of the Clausthal University of Technology are research partners in the project and responsible for the characterization and further development of electrodes as well as the model-based design of cells and stacks. RWTH Aachen University is investigating suitable joining processes for manufacturing the stacks, while OTH Regensburg is planning the gigawatt-scale production process and developing a digital twin for production ramp-up. As a tie between stack development and the establishment of series production, the research project is completed by Rhine-Waal University of Applied Sciences, which deals with market forecasts and supply chain management issues. Together with its associated partner TU Dortmund, Rhine-Waal University of Applied Sciences is also developing a cost model to evaluate manufacturing costs.

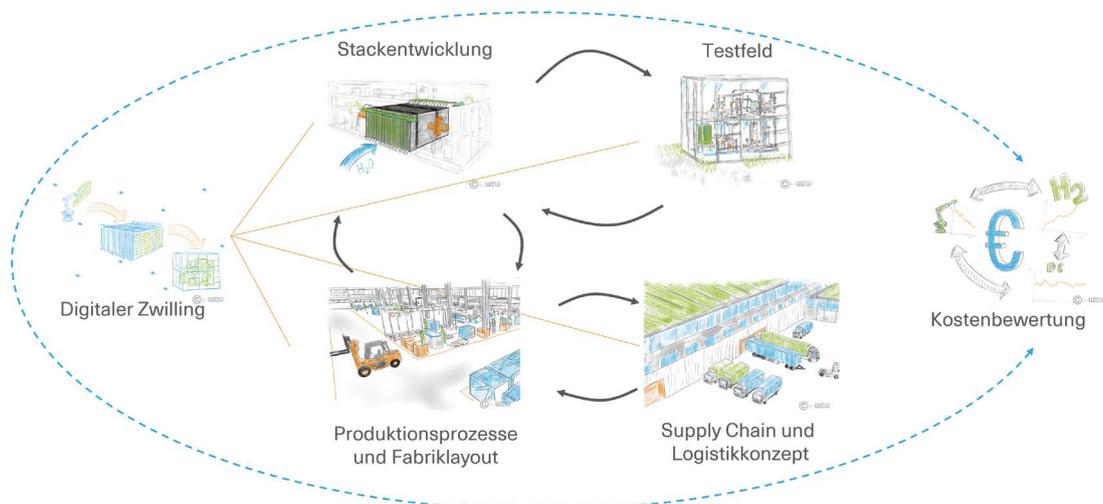


Abbildung 1: Ganzheitlicher Entwicklungsansatz innerhalb des Teilprojekts StaR (© WEW GmbH).

Verbundprojekt StaR im Rahmen der Technologieplattform H2Giga

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat im Frühjahr 2020 die nationale Wasserstoffstrategie veröffentlicht und gleichzeitig im Rahmen des Ideenwettbewerbs „Wasserstoffrepublik Deutschland“ einen Förderaufruf gestartet. Hier werden rund 700 Millionen Euro zur Förderung von Projekten in drei Fokusbereichen bereitgestellt. Einer der drei Fokusbereiche lautet „Wasserelektrolyse im Industriemaßstab“ und wird durch die Technologieplattform H2Giga koordiniert.

Das übergeordnete Ziel dieser Plattform ist es, Grundlagen für eine automatisierte Serienfertigung von Wasserelektrolyseuren für Anlagen bis in den Gigawatt-Bereich in Deutschland bei gleichzeitig signifikanten Fortschritten hinsichtlich Lebensdauer, Produktions- und Betriebskosten zu schaffen. Damit soll deutschen Unternehmen die Möglichkeit geboten werden, führender Anbieter von grünem Wasserstoff für die Industrie und den Transportsektor zu werden. Innerhalb der Technologieplattform H2Giga sind zurzeit mehr als 100 Partner aus Industrie, Wissenschaft und Verbänden in ganz Deutschland beteiligt.

Gemeinsam starteten die Projektpartner, die OTH Regensburg, die TU Clausthal, die RWTH Aachen, die Hochschule Rhein-Waal sowie der assoziierte Partner TU Dortmund mit dem Startup WEW, im April 2021 das Verbundprojekt StaR – Stack-Revolution. Zusammen werden in den vier Jahren der Projektlaufzeit Design und Herstellung von Elektrolyse-Stacks ganzheitlich untersucht und neue Konzepte, die die Herstellungskosten senken sollen, in der Praxis umgesetzt. Elektrolyse-Stacks bilden das Herzstück jeder Wasserelektrolyseanlage, da in ihnen die Umwandlung elektrischer Energie in den Energieträger Wasserstoff stattfindet.

StaR – Stack-Revolution ist ein Verbundprojekt innerhalb dieses Fokusbereiches.

Mit dem Projekt StaR soll die Reduktion der Herstellungskosten für alkalische Elektrolyseure auf einen Wert deutlich unter den aktuellen Marktprognosen für 2030 erreicht werden. Dafür wird innerhalb des interdisziplinären Projektteams ein ganzheitlicher Entwicklungsansatz gewählt, der Kostensenkungspotentiale auf allen Ebenen der Stackfertigung identifiziert und in die Produktion implementiert. Dies reicht vom produktionsorientierten Stackde-

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

StaR - Stack Revolution

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen:

03HY102B

Laufzeit

01.04.202–31.03.2025

Projektleiter:

Dr.-Ing. Maik Becker
Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek



Thomas Turek



Maik Becker



Jörn Brauns



Felix Gäde



Oliver Zielinski

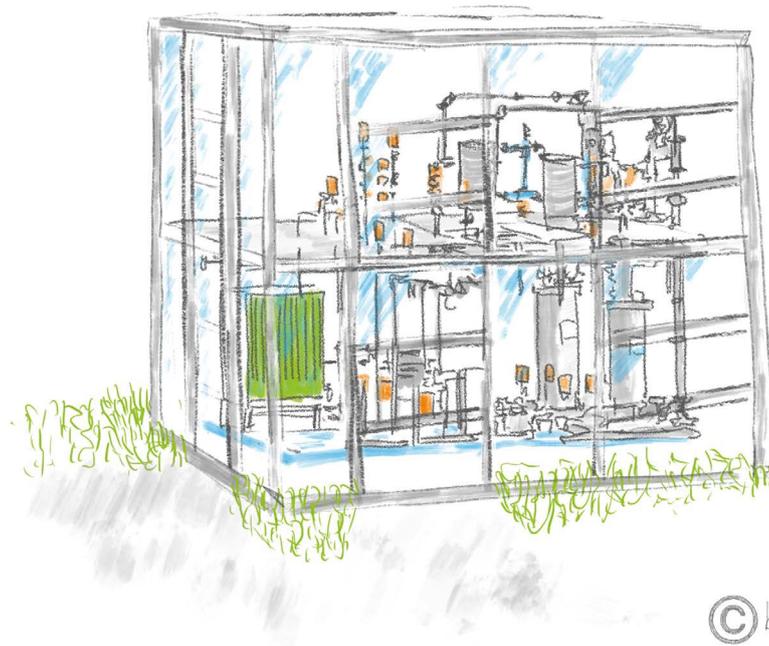


Abbildung 2: Visualisierung des Wasserelektrolysestacktestfelds (© WEW GmbH).

sign und Untersuchung kostengünstiger, funktionaler Materialien über die Entwicklung wirtschaftlich sinnvoller Produktions-, Logistik- und Supply-Chain-Konzepte bis hin zu ihrer Erprobung unter Realbedingungen (siehe Abbildung 1). So kann das Verbundprojekt StaR das Ziel, eine Hochskalierung der Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff zu generieren, die Wasserstoffentstehungskosten zu senken und eine kostenoptimale Herstellung in Deutschland zu garantieren, inklusive des damit verbundenen Aufbaus von Wertschöpfung und Arbeitsplätzen im Land, unterstützen.

Projektpartner

- WEW GmbH, Dortmund
- Hochschule Rhein-Waal, Kleve
- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
- RWTH Aachen University

Das Teilprojekt der TU Clausthal mit einem Volumen von etwa fünf Millionen Euro wird am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) bearbeitet. Dazu entsteht auf einer Fläche von 250 Quadratmetern in der Halle des Batterie- und Sensoriktestzentrums ein neues Testfeld mit Laborzellen zur Auswahl und Charakterisierung von Materialien und Zellen bis hin zur Untersuchung des neuen Stackdesigns in voller Baugröße mit einer elektrischen Leistung von 150 kW (siehe Abbildung 2). Das Team umfasst vier wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, sowie einen Techniker. Aufbauend auf den langjährigen Erfahrungen im Bereich der elektrochemischen Prozesse übernimmt die TU Clausthal im Verbundprojekt zusammen mit dem Start-up WEW die Verantwortung für alle elektrochemischen Teilaufgaben. Diese beinhalten die Materialauswahl und Materialcharakterisierung mit Fokus auf Elektroden- und Separatormaterialien, den Entwurf neuer Zelldesigns und deren experimentelle Validierung, die Entwicklung eines geeigneten Streustromvermeidungs- und Kompensationskonzepts, sowie den Betrieb und die Bewertung von Elektrolysestacks in finaler Zellgröße.

Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden

Kurzfassung

Piezelektrische Aktuatoren und Sensoren gewinnen immer mehr an Bedeutung für die Anwendung in technologischen Bereichen, wie Automobilindustrie und Energiewandlung. Nachteilig ist jedoch, dass die Anwendungstemperatur herkömmlicher piezelektrischer Materialien mit hohen piezelektrischen Koeffizienten begrenzt ist. Beispielsweise kann Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) nur bis etwa 200 °C eingesetzt werden. Hochtemperaturstabile piezelektrische Kristalle, wie Langasit ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), besitzen hingegen lediglich vergleichsweise niedrige piezelektrische Koeffizienten. Lithiumniobat (LiNbO_3 , LN) und Lithiumtantalat (LiTaO_3 , LT) weisen relativ hohe piezelektrische Koeffizienten auf. Allerdings ist ihre Anwendung bei hohen Temperaturen aufgrund der thermischen Instabilität (LiNbO_3) bzw. der niedrigen Curie-Temperatur (LiTaO_3) beschränkt. In dieser Hinsicht wird erwartet, dass $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ -Mischkristalle die oben genannten Einschränkungen der Randverbindungen des $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ -Systems überwinden.

Das Hauptziel des Vorhabens ist ein verbessertes Verständnis der Korrelation zwischen Punktdefekten, Domänenstrukturen, Ladungsmigration, akustischen Verlusten und optischen Eigenschaften in $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ -Mischkristallen, insbesondere im Hochtemperaturbereich. In diesem Zusammenhang soll die Rolle von Punktdefekten in Monodomänen und periodisch gepolten Kristallen verschiedener Zusammensetzungen untersucht werden. Nachfolgend sind die optimalen Parameter, die gleichzeitig zu hohen piezelektrischen Koeffizienten, hoher Curie-Temperatur, geringen akustischen Verlusten und einer hohen Stabilität in Bezug auf niedrige Sauerstoffpartialdrücke führen, zu ermitteln.

Abstract

Piezoelectric actuators and sensors are of high interest for application in automotive industry and energy conversion technologies. Nevertheless, the application of conventional piezoelectric materials with high piezoelectric coefficients at high temperatures is limited. For instance, lead zirconate titanate can only be used up to around 200 °C. On the other hand, high-temperature-stable piezoelectric crystals, such as langasite ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$), possess low piezoelectric coefficients. Lithium niobate (LiNbO_3 , LN) and lithium tantalate (LiTaO_3 , LT) demonstrate high piezoelectric coefficients, although their use at high temperatures is limited due to thermal instability and low Curie temperature, respectively. In this respect, $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ solid solutions are expected to overcome the above-mentioned restrictions of the individual compounds.

The primary goal of this research is improved understanding of the correlation between point defects, domain structures, charge migration, acoustic losses and optical properties in $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ solid solutions, especially in high-temperature region. In this context, the role of point defects in monodomain and periodically poled crystals with different compositions will be studied. Subsequently, the optimal parameters, which lead at the same time to high piezoelectric coefficients, high Curie temperature,

Projektpartner

Projektkoordination:

- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien (IEPT)
- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST)

Beteiligte Institute:

- Leibniz-Institut für Kristallzüchtung
- Universität Osnabrück
- Technische Universität Dresden
- Justus-Liebig-Universität Gießen
- Technische Universität Braunschweig

Externe Partner:

- Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Hungary
- Lviv Polytechnic National University, Ukraine

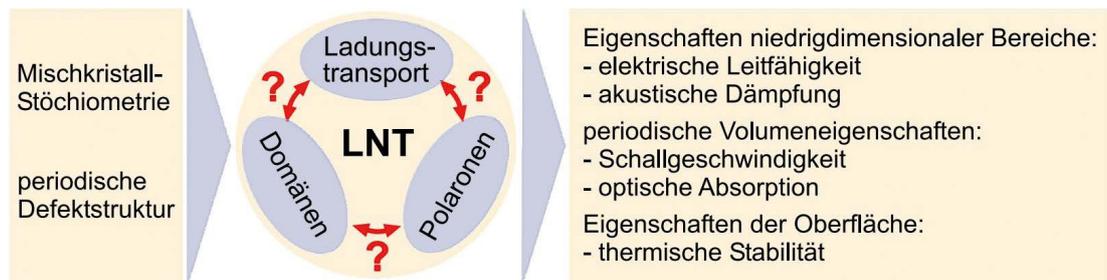


Abbildung 1: Beeinflussung der atomistischen Wechselwirkungen in LNT durch die Defektstruktur und die Mischkristallstöchiometrie sowie Beispiele für resultierende Änderungen der Materialeigenschaften.

low acoustic losses and high stability in relation to low oxygen partial pressures, should be determined.

Projekthintergrund

Polare oxidische Lithiumniobat-Lithiumtantalat-Mischkristalle ($\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$, LNT) zeigen eine vollständige Mischbarkeit über den gesamten Zusammensetzungsbereich sowie abstimmbare ferroelektrische Domänentopologien und stellen ein Modellsystem für neue Mechanismen in der Festkörperionik dar. Betrachtet wird der Einfluss von Punktdefekten, Domänenwänden und deren Wechselwirkungen auf makroskopische Materialeigenschaften. Wesentliche Aspekte sind der elektronische und ionische Transport in den Domänenwänden, deren Korrelation mit der Domänenwandladung und der Domänenwanddicke und schließlich die Gesamteffekte auf die piezoelektrischen und optischen Eigenschaften sowie die thermische Stabilität. Die Möglichkeit, den elektrischen und atomaren Transport durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung (Nb/Ta-Verhältnis, Li-Gehalt) und der Domänengröße zu kontrollieren, eröffnet neue Möglichkeiten für die Herstellung ferroelektrischer Materialien. Diese Wechselwirkungen, insbesondere der Einfluss der Domänenwände auf den Ladungstransport, die Polarodynamik und die akustischen Eigenschaften, sind im Modellsystem LNT bislang unerforscht.

Projektziele

Der Forschungsschwerpunkt liegt auf der Untersuchung des Zusammenhangs von Punktdefektconfiguration, Defektmigration und akustischen Verlusten in polaren LNT-Oxiden im Bereich von Raumtemperatur bis ungefähr

1000 °C. Die atomistischen Wechselwirkungen von Transport, Domänen und Polaronen, deren Beeinflussung durch die Mischkristallzusammensetzung und niedrigdimensionale Defektstrukturen sowie Beispiele für resultierende Änderungen der Materialeigenschaften sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

- **Temperaturbereich:** Die Versuche werden von Raumtemperatur bis zur Umwandlungstemperatur von der ferroelektrischen zur paraelektrischen Phase durchgeführt. Die Curie-Temperaturen von LN und LT betragen etwa 1200 °C bzw. 600 °C. Diese Temperatur soll für das LNT-System in Abhängigkeit von der Zusammensetzung bestimmt werden.
- **Defekt und Ladungstransport:** Die Untersuchungen werden mit Monodomänen-Kristallen begonnen und mit periodisch polarisierten Strukturen fortgesetzt. Zusätzlich soll auch bestimmt werden, welche Ionen für den Beitrag zur elektrischen Leitfähigkeit von Bedeutung sind.

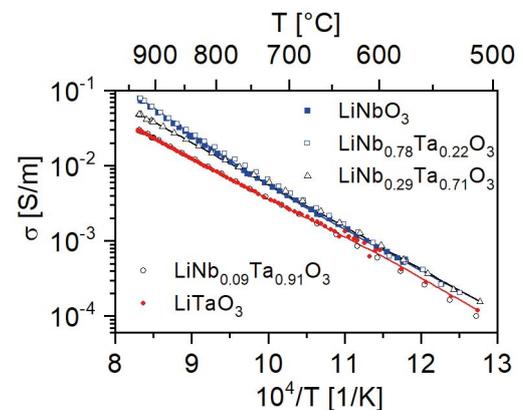


Abbildung 2: Leitfähigkeit von LNT in Luft als Funktion der Temperatur. Abbildung 3: Sauerstoffpartialdruckabhängigkeit der Leitfähigkeit von LNT bei 900 °C.

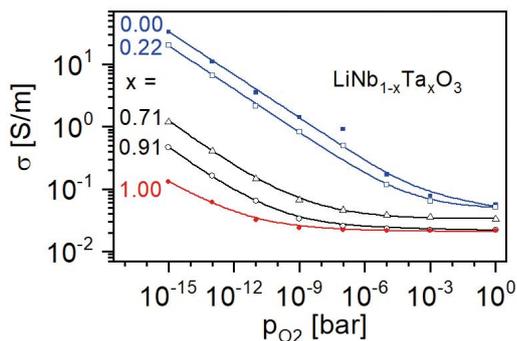


Abbildung 3 zeigt die Sauerstoffpartialdruckabhängigkeit der Leitfähigkeit verschiedener LNT-Mischkristalle bei 900 °C. Es fällt auf, dass LT und tantalreiche Mischkristalle nur einen geringen Anstieg der Leitfähigkeit mit sinkendem Sauerstoffpartialdruck zeigen. Geht man von ähnlichen Defektmodellen wie bei LN aus, ist die Elektronenleitung hier deutlich geringer. Dieser Umstand verringert die elektromechanischen Verluste entsprechender piezoelektrischer Resonatoren bzw. Bauelemente, da die elektrischen und mechanischen Eigenschaften durch den piezoelektrischen Effekt gekoppelt sind. Die Beobachtung impliziert weiterhin eine verbesserte Hochtemperaturstabilität.

- **Thermische Stabilität, elektromechanische Eigenschaften und akustische Verluste:** Hohe thermische Stabilität spiegelt sich wider in nahezu konstanten Kristalleigenschaften für kontextabhängige Temperaturen in Bezug auf Zusammensetzung (z. B. Li-Gehalt, Konzentrationsgradienten), Struktur und Defekte (z. B. Domänenwände), elektromechanische Eigenschaften (z. B. Frequenz, Leitfähigkeit). Der Einfluss des $Li_2O/(Nb,Ta)_2O_5$ -Verhältnisses soll gezielt untersucht werden, sodass Informationen über Li-stöchiometrische Kristalle zugänglich sind.

Bisherige Forschungstätigkeiten

Leitfähigkeitsmessungen

$LiNb_{1-x}Ta_xO_3$ -Mischkristalle mit Ta-Anteilen von $x = 0,22, 0,71$ und $0,91$ und mit einem Durchmesser von 1 mm wurden mit Hilfe der Micro-pulling-down-Methode hergestellt. Für diese Zusammensetzungen wurde zunächst die Leitfähigkeit in Luft bei Temperaturen bis etwa 930 °C ermittelt. Als Referenzmaterialien dienen $LiNbO_3$ und $LiTaO_3$. Abbildung 2 verdeutlicht, dass die Leitfähigkeit oberhalb von 650 °C vom

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Förderkennzeichen:

FOR-5044

Laufzeit des Vorhabens:

01.02.2021–31.01.2025

Berichtszeitraum:

01.02.2021–31.07.2021

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Clausthal

Ausführende Stelle:

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze
Dr. Yuriy Suhak

Projektkoordinator:

Stepan Hurskyy, M.Sc.
stepan.hurskyy@tu-clausthal.de

Internet:

<https://www.for5044.de/>

Tantal-Gehalt abhängt. Bei 930 °C ist die Leitfähigkeit von LT etwa um den Faktor 3 geringer als die von LN. Bemerkenswert ist, dass ein bereits relativ hoher Tantal-Anteil von $x = 0,22$ die Leitfähigkeit bezüglich reinem LN ($x = 0$) praktisch nicht verändert. Signifikante Abweichungen werden dagegen für einen Anteil von $x = 0,71$ beobachtet. Bei tantalreichen Zusammensetzungen ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Für reines LT ($x = 1$) und $x = 0,91$ unterscheidet sich die Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur praktisch nicht.

Zusammenfassend ergibt sich, dass LNT-Mischkristalle bei hohen Temperaturen und niedrigen Sauerstoffpartialdrücken eine geringere elektrische Leitfähigkeit als LN zeigen, was auf eine verbesserte Stabilität hinweist.

Literatur

- Suhak, Y., D. Roshchupkin, B. Redkin, A. Kabir, B. Jerliu, S. Ganschow und H. Fritze: Correlation of Electrical Properties and Acoustic Loss in Single Crystalline Lithium Niobate-Tantalate Solid Solutions at Elevated Temperatures. *Crystals* 2021, 11, 398. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11040398> .
- Buryy, O., I. I. Syvorotka, Y. Suhak, U. Yakhnevych, D. Sugak, S. Ubiskii, und H. Fritze: Determination of optimal crystallographic orientations for LiNbO₃ and LiTaO₃ bimorph actuators, *J. Sens. Sens. Syst.* 2021, 10, 121–126, DOI: <https://doi.org/10.5194/jsss-10-121-2021> .
- Vasylechko, L., V. Sydorhuk, A. Lakhnik, Y. Suhak, D. Włodarczyk, S. Hurskyy, U. Yakhnevych, Y. Zhydachevskyy, D. Sugak, I.I. Syvorotka et al.: Investigations of LiNb_{1-x}TaxO₃ Nanopowders Obtained with Mechanochemical Method. *Crystals* 2021, 11, 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst11070-755> .

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 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, indem Betriebstemperaturen direkter angefahren werden können. Insgesamt errechnet sich daraus eine Energieeinsparung von

25–30 % 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 (1150 °C) detektieren kann.

Grundkonzept

Resistive Metalloxidgassensoren, deren elektrische Leitfähigkeit von adsorbierenden/desorbierenden Gasmolekülen der Atmosphäre abhängt, sind bei hohen Temperaturen einsetzbar, in oxidierender und reduzierender

Projektpartner

Projektkoordination:

- Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung

Beteiligte Institute:

- 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

Atmosphäre stabil und ermöglichen eine elektrische Verarbeitung des Sensorsignals. Sie weisen jedoch eine zu geringe Gasselektivität auf, um den Konzentrationsverlauf prozessspezifischer Schlüsselgasspezies überwachen zu können. Aus diesem Grund soll ein Sensorprinzip zum Einsatz kommen, welches die Selektivität metalloxydbasierter Gassensoren erhöht, in dem neben den elektrischen auch die mechanischen Eigenschaften der Sensorschicht mithilfe einer hochtemperaturstabilen resonanten Mikrowaage bestimmt werden.

Als resonante Mikrowaage kommen planare, einkristalline, piezoelektrische Langasit- ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$) oder Catangasit- ($\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$) Substrate in Frage, die zu Dickenscherschwingungen angeregt werden können. Dazu werden sie mit schlüsellochförmigen Platin-Rhodium-Elektroden beschichtet. Auf den Elektroden wird die Sensorschicht aufgebracht (siehe Abb. 1). Ein solcher Aufbau wird als Resonator bezeichnet. Durch Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung können Volumenwellen im Resonator angeregt werden. Die elektrische Antwort dieses Systems zeigt ein Maximum der Konduktanz (Realteil der elektrischen Leitfähigkeit), wenn sich der Resonator in mechanischer Resonanz befindet. Die zugehörige Frequenz wird als Serien-Resonanzfrequenz f_R bezeichnet. Sie ist im Allgemeinen von der Temperatur und von der Massenbelastung abhängig. Die fortlaufende Messung der Serien-Resonanzfrequenz erlaubt es, Änderungen der Sensorschichten auszuwerten und auf 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 Abb. 1, links), tragen im Wesentlichen Änderungen der Massenbelastung, z.B. durch adsorbierende/desorbierende Gase, zu detektierbaren Resonanzfrequenzänderungen bei. Überlappt die Sensorschicht den Elektrodendurchmesser wie in Abb. 1 rechts, dann führen Änderungen der Sensorschichtleitfähigkeit, hervorgerufen durch Interaktionen der Sensorschicht mit der umgebenden Gasatmosphäre, ebenfalls zu einer Änderung der Serien-Resonanzfrequenz.

Bisherige Forschungstätigkeiten

Auswahl der Sensorschichten:

Auf der Grundlage optischer und massenspektroskopischer Untersuchungen sind Methan (CH_4), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2) und Ethen (C_2H_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 (SnO_2), Titanoxid (TiO_2) und Praseodym dotiertes Ceroxid ($\text{Pr}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_2$) wurden im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche als geeignete Kandidaten zur Detektion der Schlüsselgase ausgewählt.

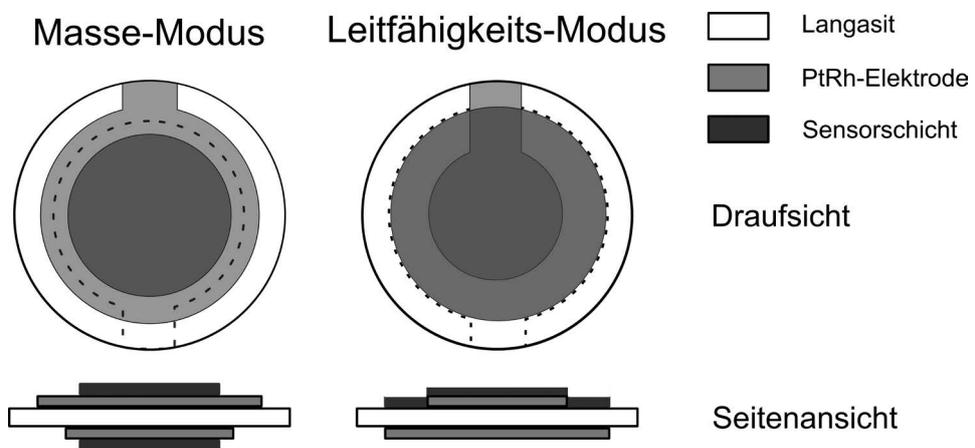


Abbildung 1: Schichtfolge zur Unterscheidung mechanischer (Masse-Modus; links) und elektrischer (Leitfähigkeitsmodus; rechts) Änderungen der Schichteigenschaften zur Selektivitätssteigerung in der Gassensork.

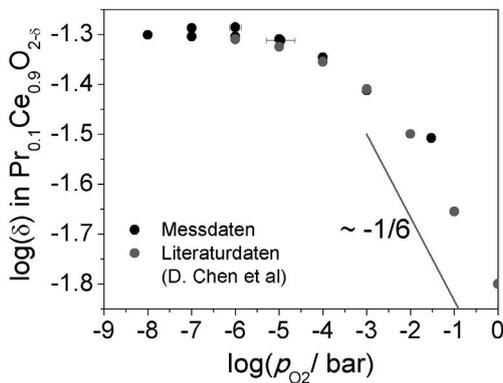


Abbildung 2: Sauerstoffdefizit δ bei Variation des Sauerstoffpartialdruckes zwischen 10^{-1} bar und 10^{-8} bar für einen beidseitig mit $\text{Pr}_{0,1}\text{Ce}_{0,9}\text{O}_{2-\delta}$ beschichteten Cantangasit-Resonator bei 700°C . Vereinfacht entnommen aus [1].

Die Sensorschichten wurden im Rahmen von Laboruntersuchungen und Tests bei externen Partnern charakterisiert.

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

Praseodym dotiertes Ceroxid ($\text{Pr}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-\delta}$) kann in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes Sauerstoffatome aufnehmen oder abgeben. Verglichen mit anderen oxidischen Materialien erreichen dünne PCO-Schichten relativ hohe Sauerstoffdefizite bereits bei vergleichsweise

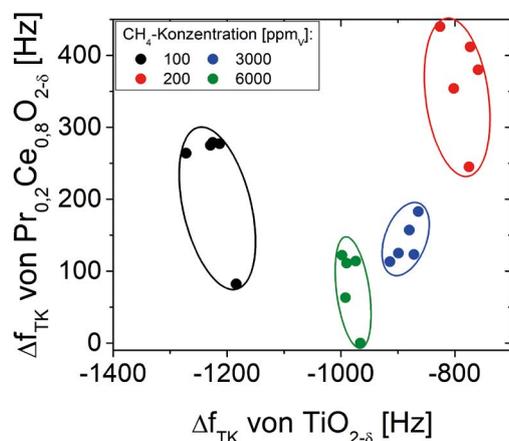


Abbildung 3: Kennlinienfeld bei 700°C für eine $\text{Pr}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{2-\delta}$ -Schicht im Mikrowaage-Modus und eine $\text{TiO}_{2-\delta}$ -Schicht im Leitfähigkeitsmodus für verschiedene Konzentrationsverhältnisse von CH_4 und C_2H_4 .

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Konzentrationsabhängige Industrieofenregelung – Teilvorhaben: Sensorschicht- und Sensorentwicklung im Labormaßstab

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Projektträger Jülich (ptj)

Förderkennzeichen:

03ET1467B

Laufzeit des Vorhabens:

01.12.2016–30.11.2020

Berichtszeitraum:

01.12.2016–30.11.2020

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Clausthal

Ausführende Stelle:

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

Projektkoordinator:

Sebastian Schlack, M.Sc.
sebastian.schlack@tu-clausthal.de

Internet:

<http://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&id=4222259&v=10&q=KonAIR>

hohen Sauerstoffpartialdrucken von $10^{-0.7}$ bar bis 10^{-6} bar. Massenänderungen der Schicht, die sich aus der Aufnahme oder Abgabe von Sauerstoff ergeben, sind mittels Cantangasit ($\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$) basierter Mikrowaage detektierbar. Abbildung 2 zeigt gemessene Sauerstoffdefizite für eine $\text{Pr}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$ -Schicht von $1 \mu\text{m}$ gemessen bei 700°C .

Die Messungen zeigen, dass Masseänderungen der $\text{Pr}_{0.1}\text{Ce}_{0.9}\text{O}_{2-\delta}$ -Schicht von $0,2 \mu\text{g}$ detektierbar sind. Die 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 zeigen, dass mit TiO_2 - und $\text{Pr}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ -Sensorschichten Gasmischungen aus Methan und Ethen selektiv detektiert werden können. Die TiO_2 -Sensorschicht wird dabei im Leitfähigkeits- und die $\text{Pr}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ -Sensorschicht im Mikrowaage-Modus betrieben. Die Verschiebungen der Serienresonanzfrequenz Δf_R beider Resonatoren werden dazu gegeneinander in einem sogenanntem Kennlinienfeld (siehe Abbildung 3) aufgetragen.

Beobachtet werden die von Anhäufungen der Datenpunkte in Abhängigkeit der Methan- bzw. Ethenkonzentration. Aus der Verschiebung von Δf_R kann mit Hilfe der Kennlinienfelder auf die

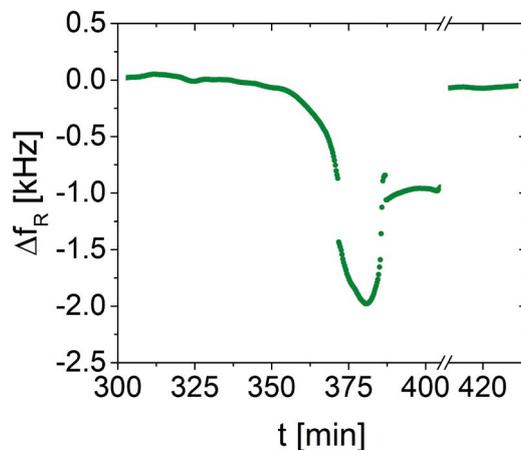


Abbildung 4: Resonanzfrequenzverschiebung eines piezoelektrischen Resonators mit einer TiO_2 -Sensorschicht, wenn bei der Entbinderung reduzierende Gase freigesetzt werden.

Konzentration von Methan und Ethen zurück geschlossen werden. Dieser Effekt wurde für den Untersuchungsbereich zwischen 500°C und 700°C beobachtet, wobei die Δf_R temperaturabhängig sind.

Untersuchungen der Sensorschichten bei Projektpartnern:

Die auf den piezoelektrischen Resonatoren abgeschiedenen Sensorschichten wurden bei Projektpartnern unter Laborbedingungen und auch im industriellen Umfeld erfolgreich betrieben. Mit TiO_2 - und $\text{Pr}_{0.2}\text{Ce}_{0.8}\text{O}_2$ -Sensorschichten, die im Leitfähigkeits- bzw. Mikrowaage-Modus betrieben wurden, konnte die Gasfreisetzung bei der Entbinderung beobachtet werden. Um Störeinflüsse zu identifizieren, wurde stets ein zusätzlicher Referenzresonator verwendet. Abbildung 4 zeigt, wie sich die Resonanzfrequenz des Resonators mit TiO_2 -Sensorschicht verschiebt, wenn reduzierende Gase bei der Entbinderung freigesetzt werden. Die Resonanzfrequenzverschiebung nimmt im dargestellten Bereich mit zunehmender Prozesszeit zunächst stark ab, durchläuft ein Minimum, bleibt für einige Minuten auf einem konstanten Niveau und nimmt im Anschluss wieder zu. Nachdem die Entbinderung abgeschlossen ist, erreicht auch die Resonanzfrequenz ihren Ausgangswert, sodass wieder $\Delta f_R = 0$ gilt, was die Stabilität des Messsystems unterstreicht.

Das Projekt KonAIR ist damit zu einem erfolgreichen Abschluss gebracht worden. Die Projektergebnisse demonstrieren, dass die Entbinderung der untersuchten Werkstoffe mittels selektiver Gassensorik auf Basis piezoelektrischen Resonatoren beobachtet werden können.

Zugehörige Publikationen

Schröder, Sebastian und Holger Fritze: Lattice-based Microbalance for the Determination of the Non-Stoichiometry in Praseodymium-Cerium Thin Films at Elevated Temperatures. Proceedings Sensor 2017, 98–103. DOI: 10.5162/sensor2017/A4.4 .

Schröder, Sebastian und Holger Fritze: Gassensor zur Konzentrationsüberwachung von Methan bei Wärmebehandlungsprozessen. Proceedings 13. Sensor Symposium 2017, 28–33. DOI: 10.5162/13dss2017/1.7 .

Schröder, Sebastian und Holger Fritze: Resonant Gas Sensor for Heat Treatment Processes Proceedings ITG-Fb 281: Sensoren und Messsysteme, 2018, 422–426.

Schröder, Sebastian, Di Chen, Sean R. Bishop, Harry L. Tuller und Holger Fritze: Thin Film Nano-Thermogravimetrie Applied to Praseodymium-Cerium Oxide Thin Films at High-Temperatures. *Applied Physics Letters* 112, 2018, 213502–213507. DOI: 10.1063/1.5025389 .

Schröder, Sebastian und Holger Fritze. Combined Conductivity and Gravimetric Resonant Gas Sensor for High-Temperature Applications. *Proceedings 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Euroensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII)*, 2019, 1161–1164. DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808747 .

Schröder, Sebastian, Alexander Strauß, Peter Quadbeck und Holger Fritze: Selektive Piezoelectric Gas Sensor for Hydrocarbons. Posterbeitrag Euromat 2019, Stockholm, Schweden.

Referenzen

- [1] Schröder, Sebastian, Di Chen, Sean R. Bishop, Harry L. Tuller und Holger Fritze. Thin Film Nano-Thermogravimetrie Applied to Praseodymium-Cerium Oxide Thin Films at High Temperatures. *Applied Physics Letters* 112, 2018, 213502–213507. DOI: 10.1063/1.5025389 .

LOReley: Leistungsdichte H₂-Freisetzung in LOHC-Reaktoren mittels effizienter Flächenkatalysatoren

Kurzfassung

Die Bereitstellung von elektrischer Primärenergie aus erneuerbaren Quellen ist stark von den tages- und jahreszeitlichen Schwankungen abhängig und kann somit nur begrenzt an den Bedarf des Verbrauchers angepasst werden. Es bedarf daher einer Speicherung bspw. in Form eines Sekundärenergieträgers zur zeitlichen Entkopplung. Hierbei stellt der Wasserstoff eine saubere und vielseitige Lösung zur Speicherung dieser elektrischen Energie dar. Um den Wasserstoff im Industrie- und Verkehrssektor einsetzen zu können, ist eine sichere und effiziente Speicher- und Transportmöglichkeit notwendig. Mit den so genannten LOHCs (kurz engl. Liquid Organic Hydrogen Carriers) wird eine vielversprechende und unkomplizierte Perspektive aufgezeigt, um große Mengen an Wasserstoff zu speichern und nach Bedarf einzusetzen. Mittels der am EST laserstrukturierten Flächenkatalysatoren soll ein neues Konzept zur Dehydrierung der LOHCs entwickelt werden. Im Fokus stehen neben der morphologischen und physikalischen Charakterisierung der Flächenkatalysatoren die Analyse der Blasenentwicklung während der Dehydrierung mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera und eines Schaureaktors.

Abstract

The supply of primary energy from renewable sources is strongly dependent on daily

and seasonal fluctuations and therefore can be adjusted only to a limited extent to the consumer's requirements. For this reason, storage for example in the form of a secondary energy carrier is required for the temporal decoupling. Hydrogen is a clean and versatile solution for storing the electrical energy. In order to use the hydrogen in the industrial and transport sector, a safe and efficient storage and transport option is necessary. The so called LOHCs (Liquid Organic Hydrogen Carriers) offer a promising and uncomplicated perspective for storing huge amounts of hydrogen and using it as required. By using laserstructured surface catalysts from the EST a new concept is developed for the dehydrogenation of LOHCs. In addition to the morphological and physical characterisation of the surface catalysts, the focus is on the analysis of bubble development during dehydrogenation using a high-speed camera and a show reactor.

Projektstand

Derzeit erfolgt die katalytische Dehydrierung der LOHCs in Rohrreaktoren aus einem oder mehr Rohren. In diesen befindet sich eine Pelletschüttung aus Platin auf einem Aluminiumoxidträger als Katalysator. Der Rohrreaktor wird durch ein Thermofluid, welches den Reaktor extern umströmt, auf eine Temperatur von ca. 300 °C erwärmt. Aufgrund der Endothermie der Dehydrierungsreaktion bildet sich ein Temperaturgradient mit abnehmender Temperatur in der Rohrmitte aus. Mit zunehmender Aktivität sinkt folglich die Temperatur immer weiter ab, wodurch die Katalysatorpellets in der Reaktormitte weniger produktiv werden. Einen Lösungsansatz zur Verringerung des Produktivitätsverlustes bieten Wandreaktoren, bei welchen der Katalysator auf die Wandung aufgebracht wird. Auf diese Weise kann durch die gleichmäßige Wärme das Katalysatormaterial vollständig genutzt werden. Eine Steigerung der Raum-Zeit-Ausbeute kann zusätzlich durch die Erhöhung der spezifischen Oberfläche der Flächenkatalysatorträger erzielt werden. Zur Vergrößerung der Oberfläche bietet der Fem-

Projektpartner

- Fraunhofer HHI
- Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
- Hydrogenious LOHC Technologie GmbH
- Kelvion PHE GmbH
- Amphos GmbH
- MIOPAS GmbH

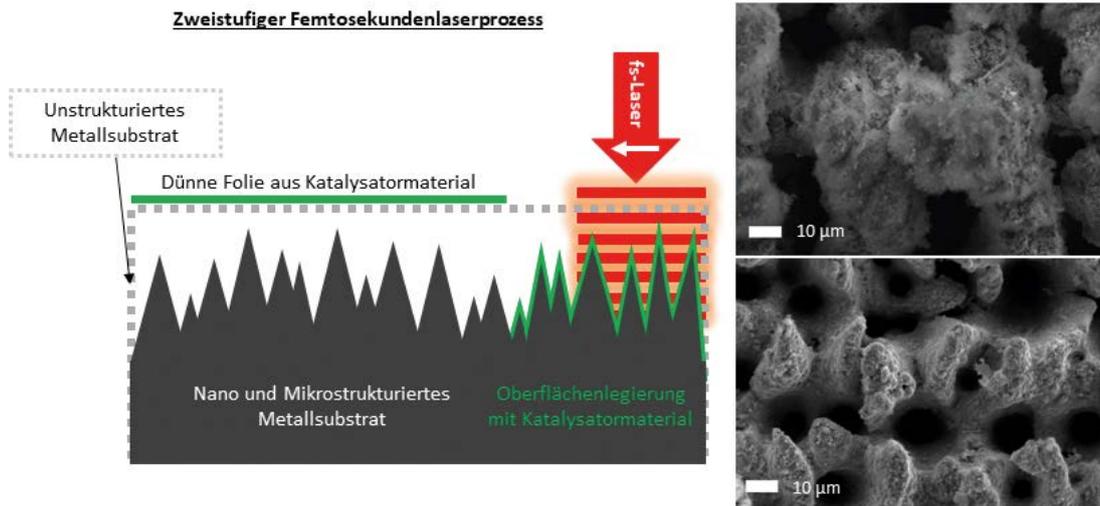


Abbildung 1: Schema des zweistufigen Femtosekundenlaserprozess sowie die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer mit Platin beladene Aluminium- (oben) und Edelfstahlprobe (unten).

tosekundenlaserprozess eine vielversprechende Methode, bei welcher nicht nur eine mikro- und nanostrukturierte Oberfläche erzielt werden kann, sondern auch innerhalb des Prozesses Metallverbindungen aus einem Träger- und einem Katalysatormaterial erzeugt werden. Somit besteht die Möglichkeit, neben der Modifikation der Oberfläche auch das entsprechende Material katalytisch zu aktivieren. Das hat zum einen den Vorteil, dass kein zusätzlicher Prozessschritt für die Aufbringung von Katalysatormaterial notwendig ist. Zum anderen kann dadurch der Anteil der kostenintensiven Edelmetallkatalysatoren reduziert werden.

Für die Entwicklung des Plattenreaktors eignen sich hauptsächlich Aluminium, Aluminiumverbindungen sowie einige Edelfstahltypen. Als Katalysator wird in erster Linie Platin eingesetzt, welches für den Laserprozess in dünnen Folien mit einer Dicke von ca. 300 nm vorliegt. Die Bildung der Metallverbindung erfolgt über

den zweistufigen Laserprozess (Abbildung 1), bei welchem im ersten Schritt die Mikro- und Nanostrukturen gebildet werden und im zweiten Schritt das Platin von der dünnen Folie in die strukturierte Oberfläche eingebracht wird. Bisher konnte über dieses Verfahren ein Edelfstahltyp (1.4404) und eine Aluminiumverbindung (AlMg3) mit Platin beladen werden.

Eine Untersuchung der Aktivität erfolgt derzeit in Zusammenarbeit mit der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg (FAU).

Neben der Beladung mit Katalysatormaterialien wirkt sich die veränderte Benetzbarkeit durch die erzeugten Nano- und Mikrostrukturen positiv auf die katalytische Aktivität aus. Die hydrophilen Benetzungseigenschaften sorgen dafür, dass der freigesetzte Wasserstoff sich schnell von der Oberfläche löst und somit nur ein geringer Anteil der Katalysatoroberflächen blockiert wird. Zudem sorgt der stetige Strom

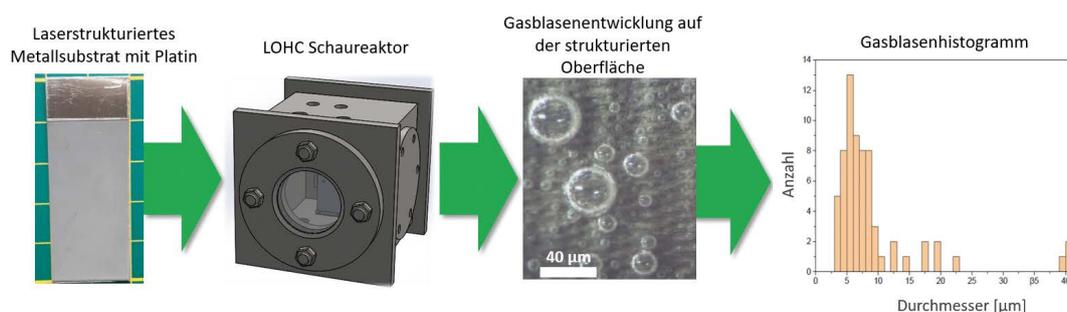


Abbildung 2: Untersuchungsschema der Gasblasenentwicklung auf katalytisch aktiven Metallsubstraten (1. v.l.) während des Dehydrierungsvorganges mittels eines Schaureaktors (2. v.l.). Die Gasblasen werden in einem Histogramm nach ihrer Größe klassifiziert.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

LOReley: Leistungsdichte H₂-Freisetzung in LOHC-Reaktoren mittels effizienter Flächenkatalysatoren

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Förderkennzeichen:

03E13023C

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2020–30.06.2023

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektkoordinator:

Luise Hoffmann, M.Sc.

von Wasserstoffblasen für eine Durchmischung wasserstoffreicher und wasserstoffarmer LOHC in die Reaktionszone.

Die Eigenschaften der Gasblasenbildung sowie der Konvektion werden hier am Forschungszentrum mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera und einem dafür speziell angefertigten Schaureaktor analysiert (Abbildung 2). Dazu wurde eine Auswertesoftware entwickelt, welche in der Lage ist, die Gasblasen nach der Größe zu klassifizieren sowie die Aufstiegs geschwindigkeit zu bestimmen.

Das Verbundprojekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und koordiniert vom Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut. Die Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg steht als Partner mit jahrelanger Erfahrung auf dem Gebiet der Wasserstoffspeicherung für die Analyse der beladenen Metallsubstrate zur Seite. Die genannten Metallsubstrate werden von dem assoziierten Partner Kelvion PHE GmbH zur Verfügung gestellt.



Thomas Gimpel



Luise Hoffmann

FemtoPEM: Optimierung poröser Transportschichten für die PEM-Elektrolyse mittels Femtosekundenlaser-Oberflächenstrukturierung

Kurzfassung

Um die schwankende Leistung von erneuerbaren Energiequellen effizient zu nutzen, ist es unabdingbar, überschüssigen Strom für Zeiten hoher Nachfrage oder geringer Produktion zwischenspeichern. Ein wichtiger Energieträger ist hierbei Wasserstoff, der sich leicht und ohne schädliche Nebenprodukte durch die Elektrolyse von Wasser herstellen lässt. Eines der industriell gängigen Verfahren ist hierbei die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEM-EL). Eine zentrale Komponente eines PEM-Elektrolyseurs ist die poröse Transportschicht. Sie leitet Wasser zur Membran, die entstehenden Gase ab und dient gleichzeitig als Stromleiter. Hier liegt großes Optimierungspotential, um elektrische und Transportwiderstände zu senken.

Im Rahmen des Projekts wird versucht, die Oberfläche der PTL mittels Femtosekundenlaser-Materialbearbeitung zu optimieren. Das Verfahren erlaubt gleichzeitig, sowohl die Oberfläche zu strukturieren, als auch Atome aus Beschichtungen oder der Prozessatmosphäre einzulegieren. Durch die so erzeugte vergrößerte Kontaktfläche können die elektrischen Widerstände gesenkt werden, während die korrosionsbeständigen Oberflächenlegierungen die Lebensdauer der Komponente erhöhen.

Abstract

To efficiently use the dynamic production of energy by renewable energy sources, it is essential to store surplus energy in times of high yield and low consumption.

An important energy storage medium is hydrogen because it can be produced easily and without harmful byproducts by water electrolysis. One of the most important production methods is the Proton Exchange Membrane Electrolysis (PEM-EL), with a central component of a PEM-Electrolyzer being the porous transport layer (PTL). It carries water to the membrane, disposes of the created gases and acts as electrical conductor. There is great potential for optimization by reducing ohmic and transport-losses.

During the project, the research aims to optimize the surface of the PTL by femtosecond-laser-treatment. This method allows for simultaneous surface structuring and alloying with atoms from coatings or process gasses. Due to increased contact and corrosion resistant surfaces created by this process, we aim to reduce energy losses and increase lifetime of the component.

Hintergrund

Die PEM-Elektrolyse zeichnet sich besonders durch Einsetzbarkeit mit dynamischen Stromquellen und durch die hohe Reinheit des entstehenden Wasserstoffes aus, allerdings sind die benötigten Elektrolyseure im Vergleich zu z.B. alkalischen Elektrolyseuren sehr teuer.

Dies liegt zum einen an den benötigten Katalysatormaterialien wie Platin oder Iridium, andererseits an den für die PTL benötigten korrosionsbeständigen Materialien. Während für eine PEM-Brennstoffzelle preisgünstiger Kohlenstoff verwendet werden kann, würden die stark sauren Verhältnisse sowie die hohe Spannung zur Zersetzung dieses Materials führen. Also muss auf teureres Titan zurückgegriffen werden, das durch sein Oberflächenoxid eine sehr hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist.

Hierfür werden Platten aus gesinterten Titanfasern oder Titanschäume eingesetzt. Dieser Werkstoff stammt aus der Filterindustrie und wurde bisher kaum für den Einsatz als PTL optimiert.

Projektpartner

- Leibniz Universität Hannover (LUH)
- Technische Universität Clausthal
- Institut für Solarforschung Hameln (ISFH)

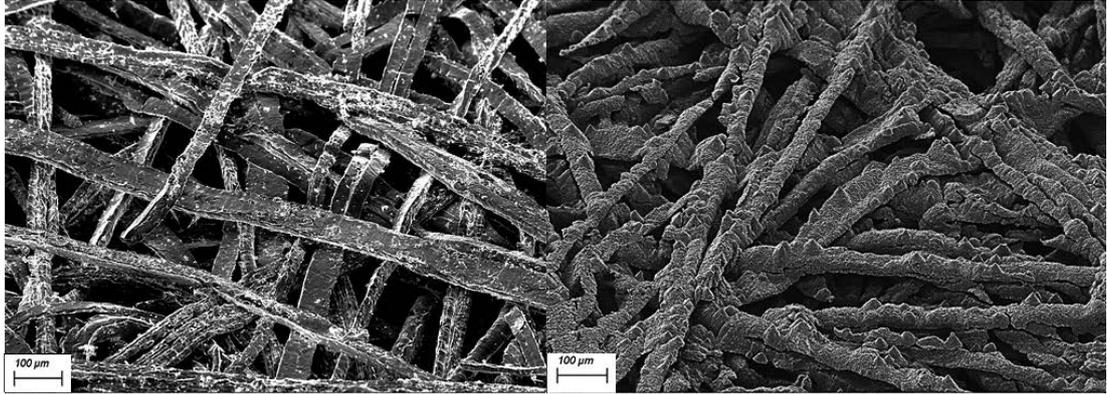


Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer PTL vor (links) und nach (rechts) der Laserbearbeitung.

Hier kommt FemtoPEM ins Spiel. Ziel des Projekts ist es, elektrische Verluste, die an den Grenzflächen zwischen PTL und den angrenzenden Komponenten entstehen, durch eine Oberflächenstrukturierung zu verringern und so eine Effizienzsteigerung zu erzielen. Gleichzeitig soll durch gezieltes Einbringen von Fremdatomen wie Stickstoff, Ruthenium oder Iridium eine hoch korrosionsbeständige Schicht erzeugt werden, um die Lebensdauer der Komponente zu erhöhen. Hierdurch können die laufenden Kosten für die Wasserstoffproduktion drastisch gesenkt werden.

Weiterhin könnte im weiteren Verlauf des Projekts die Katalysatorschicht direkt auf die PTL aufgebracht werden und so gleichzeitig als Korrosionsschutz und Katalysator dienen. Dies würde sehr viel teures Platin einsparen und so die Anschaffungskosten signifikant senken.

Projektstand

Im Rahmen des Projekts konnten bereits einige Erfolge erzielt werden.

So wurden die Laserparameter für die Strukturierung der PTLs optimiert, um eine größtmögliche Oberflächenvergrößerung zu erzielen, ohne gravierende Schäden an den dünnen Fasern des Materials zu erzeugen. So kann sichergestellt werden, dass die ursprüngliche Funktion des Materials erhalten bleibt, während die Oberfläche für den verbesserten elektrischen Kontakt strukturiert wird.

Weiterhin konnte durch den Laserprozess unter Stickstoffatmosphäre eine reproduzierbare Herstellung von Titannitrid-Oberflächen erreicht werden. Titannitrid weist nicht nur eine überragende Korrosionsbeständigkeit auf, sondern

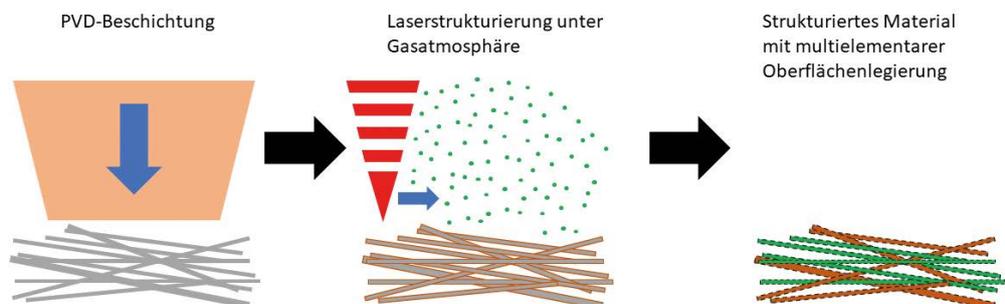


Abbildung 2: Schematischer Ablauf des Verfahrens zur gleichzeitigen Strukturierung und Erzeugung multielementarer Oberflächenlegierungen.

hat eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit als das native Oxid von Titan. So können die Lebensdauer erhöht und die elektrischen Verluste gesenkt werden.

Im weiteren Verlauf des Projekts sollen diese Ergebnisse quantifiziert, sowie auf weitere Materialien übertragen werden. Zusätzlich soll die Möglichkeit erprobt werden, während des Laserprozesses Elemente aus der Platingruppe einzulegen. So könnte nicht nur die Säurefestigkeit weiter erhöht werden, auf lange Sicht könnte auch die Notwendigkeit einer zusätzlichen Katalysatorschicht aus diesen teuren Materialien entfallen.

Hierfür arbeiten wir in diesem Verbundprojekt eng mit unseren Projektpartnern, dem Institut für Solarforschung in Hameln (ISFH) zusammen, die vor allem für die Beschichtung und die Alterungstests verantwortlich sind, sowie mit dem Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) die uns bei der In-situ-Charakterisierung der PTLs sowie der theoretischen Modellbeschreibung unterstützen.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

FemtoPEM: Femtosekundenlaser-Strukturierung und Oberflächenfunktionalisierung zur Minimierung der elektrischen Kontakt- und Massentransportwiderstände bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer von Protonenaustauschmembran (PEM)-Wasserelektrolyseuren

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen:

03SD0612C

Laufzeit des Vorhabens:

01.03.2021–29.02.2024

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektkoordinator:

Dorian Hüne, M.Sc.



Thomas Gimpel



Dorian Hüne

FemtoPlat: Verdampfung und Kondensation in Plattenwärmeübertragern mit funktionalisierten Oberflächen aus einem Femtosekundenlaserprozess

Kurzfassung

Seit über dreißig Jahren werden Plattenwärmeübertrager (PWÜ) stetig weiterentwickelt. Dank ihrer kompakten Bauform, den hohen Wärmeübertragungskoeffizienten und ihres niedrigen Verschmutzungsgrades kommen sie in zahlreichen wissenschaftlichen und technischen Bereichen zum Einsatz. Vorteile, die sich durch eine weitere Optimierung der Plattenoberflächen noch weiter verstärken ließen. Ein Ansatz hierfür ist die Bearbeitung mittels Femtosekundenlaserpulsen, die durch die stark lokal begrenzte, hohe Energieeinbringung in der Lage ist, die Oberfläche der PWÜ zu strukturieren.

Im Projekt FemtoPlat geht es darum, die Effizienz von PWÜ durch eine femtosekundenlaserstrukturierte metallische Oberfläche zu steigern. Ziel hierbei ist die Erzeugung von hydrophilen und hydrophoben Oberflächen, um Verdampfung und Kondensation innerhalb des Wärmeüberträgers gezielter zu steuern.

Abstract

Although plate heat exchangers (PHE) were developed much further back, they have been improved for more than 30 years. Thanks to their compact design, high heat transfer coefficients, and their low level of contamination ability, they are used in numerous scientific and technical areas. In addition, heat exchangers have various advantages associated with the

Projektpartner

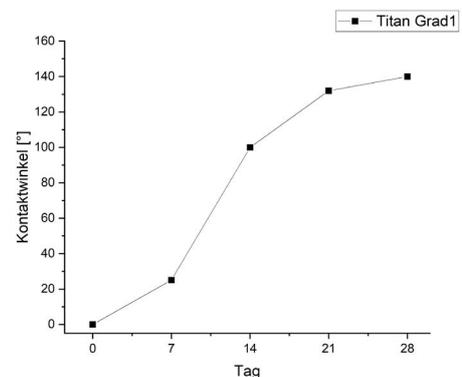
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Thermodynamik IFT
- Technische Universität Clausthal, Forschungszentrum Energiespeicher Technologien EST

surface properties. In this work, the surfaces are functionalized by femtosecond laser pulses, featuring high intensities and a small heat-affected zone within a specific area.

The FemtoPlat-Project deals with increasing the efficiency of PHE in order to control the surface wettability properties of materials. The goal is to create hydrophilic or hydrophobic surfaces for vaporization and condensation applications, respectively.

Hintergrund

In der Forschung existiert zum einen der Ansatz, das Strömungsverhalten der Fluide und den Initiierungsprozess der zweiphasigen Wärmeübertragung durch geometrische Anpassung der Oberfläche zu beeinflussen. Das können makroskopisch oder mikroskopisch geformte Plattenstrukturen sein. Zum anderen wird eine Funktionalisierung der wärmeübertragenden Oberflächen angestrebt, z. B. durch Steuerung der Benetzbarkeit bzw. des Kontaktwinkels zwischen Fluid und Wand. Hierfür wird die Materialoberfläche mittels eines Ultrakurz-puls lasers mit Pulslängen im Femtosekundenbereich funktionalisiert. Da die Wechselwirkung zwischen dem Laserstrahl und der Werkstoff auf einer kurzen Zeitskala ($f_s=10^{-15}$ s) auftritt,



Grafik 1: Benetzbarkeitsänderung mit der Zeit für Titan Grad1.

ermöglicht der Femtosekundenlaser-Prozess einen Ablationsprozess mit minimalem Wärmeeintrag ins Material. Darüber hinaus lassen sich Fremdatome in die metallische Oberfläche einlagern.

Sowohl in der Literatur [1, 2] als auch in unseren Versuchen ist zu sehen, dass der Kontaktwinkel sich nach der Oberflächenstrukturierung mit der Zeit zwischen 10–30 Tage ändert, wie in der Grafik 1 zu sehen ist. Während die Oberfläche direkt nach der Laserstrukturierung superhydrophil ist, verändert sie sich innerhalb 14 Tagen zu hydrophob. Ein Ziel des Projektes ist, die Benetzbarkeit der Metalloberflächen auf lange Sicht stabil zu halten.

Aktueller Projektstand

Im Projekt FemtoPlat wird das Manipulieren bzw. Kontrollieren des Kontaktwinkels ohne Nachbehandlung der Oberflächen (Silanisierung, Beschichtung u.ä.) angestrebt, um die Effizienz der PWÜ zu verbessern. Hierfür werden die Titan- (Grad 1) und Edelstahl- (1.4404) Oberflächen mithilfe eines Femtosekundenlasers unter diversen Gasatmosphären (N_2 , Ar, SF_6) strukturiert und es wird versucht, einige Fremdatome aus verschiedenen Quellen in der Oberfläche einzubringen. Einerseits spielen die Formen der Oberflächenstrukturen (Mikrorippen, konische Spitzen, poröse Kavitäten u.ä.) eine wichtige Rolle für die Benetzbarkeit, andererseits stehen die chemischen Bindungen auf der Oberfläche im Vordergrund. In der Abbildung 1 ist zu sehen, dass die Benetzbarkeit von Titan trotz gleicher Oberflächen-Geometrien verschieden ist. Dieser Effekt liegt an den chemischen Bindungen auf der Oberfläche. Überdies sind die Herausforderungen, sinnvolle Element-quellen auszuwählen und sicherzustellen, dass diese Elemente auf der strukturierten Oberfläche langzeitstabil einlagern sind. So erwarten wir, dass die erdalkalischen Metalle, z.B. Kalzium (Ca), die langzeitige Super-Hydrophilie sichern. Im Gegensatz dazu führen voraussichtlich Fluorverbindungen z.B. aus PTFE-Quellen (Polytetrafluorethen, Teflon®) zu hydrophoben Eigenschaften. Beide Materialien, PTFE und Ca, werden im pastenförmigen Zustand im Laserprozess umgesetzt, was in einer späteren Anwendung eine günstige Skalierbarkeit verspricht. In der Fortsetzung des Projekts werden die Oberflächenstrukturen, Materialzusammensetzungen sowie Benetzungsverhalten charakterisiert. An dieser Stelle führt die Arbeitsgruppe an der LU Hannover

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

FemtoPlat: Verdampfung und Kondensation in Plattenwärmeübertragern mit funktionalisierten Oberflächen aus einem Femtosekundenlaserprozess

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Förderkennzeichen:

GI 1299/2-1

Laufzeit des Vorhabens:

01.03.2021–29.02.2024

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektkoordinator:

Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac,
Leibniz Universität Hannover

Projektmitarbeiter:

Mehmet Ali Gümüşkesen, M.Sc.



Thomas Gimpel



Mehmet Ali
Gümüşkesen

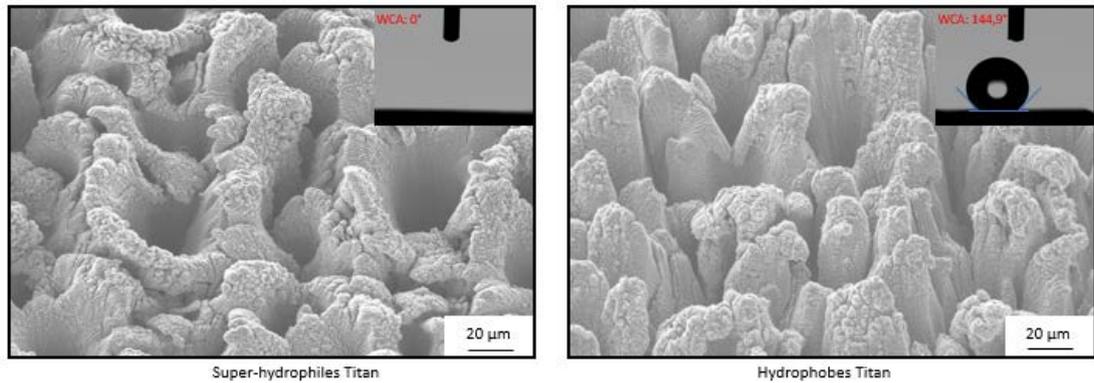


Abbildung 1: Strukturierte Titan-Oberfläche für die Steuerung der Benetzbarkeit.

experimentelle Untersuchungen zur Effizienz dieser funktionalisierten Oberflächen in Plattenwärmeübertrager-Testständen durch.

Literatur

- [1] Li, B., Li, H., Huang, L., Ren, N., Kong, X.: "Femtosecond pulsed laser textured titanium surfaces with stable superhydrophilicity and superhydrophobicity", Applied Surface Science 389, 2016, 585–593.
- [2] Lu, J., Huang, T., Liu, Z., Zhang, X., Xiao, R.: "Long-term wettability of titanium surfaces by combined femtosecond laser micro/nano structuring and chemical treatments", Applied Surface Science 459, 2018, 257–262.

MoBat: Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnella-detechnik

Kurzfassung

Im Verbundprojekt „MoBat“ soll ein modulares Hochleistungsbatteriesystem entwickelt werden, welches eine Skalierbarkeit für verschiedenste Anwendungen ermöglichen soll. Zudem soll aufgezeigt werden, dass durch Schnellladungen auf kostspielige und aufwendige Batteriewechselkonzepte in Industrie- und ÖPNV-Anwendungen verzichtet werden kann. Im Projekt „MoBat“ soll daher ein Gesamtkonzept bestehend aus Hardware, Steuerung, Kommunikation und Sicherheitstechnik im Zusammenspiel mit modularen Batteriesystemen erstellt und realisiert werden.

Das Teilprojekt der TU Clausthal hat zum Ziel, neuartige Schnellladealgorithmen für Hochleistungsbatterien zu identifizieren und sie hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das prognostizierte Alterungsverhalten, und damit auf die Lebensdauer, von Batteriesystemen hin zu bewerten. Hierzu sind die ausgewählten Ladeverfahren in verschiedensten Tests auf Zell-, Modul- und Systemebene anzuwenden.

Abstract

In the joint research project "MoBat", a modular high-performance battery system is to be developed, which should lead to scalability for a wide range of applications. In addition, it will be demonstrated that fast charging can eliminate the need for costly and complex battery replacement concepts in industrial and public transport applications. In the "MoBat" project, an overall concept consisting of hardware, control, communication and safety technology in interaction with modular battery systems is therefore to be created and implemented.

The subproject at Clausthal University of Technology aims to identify novel fast charging algorithms for high-performance batteries and to evaluate them with regard to their effects on the predicted aging behavior, and thus on the service life, of battery systems. To this end, the selected charging methods are to be applied in

a wide variety of tests at cell, module and system level.

Zielsetzung des Forschungsverbundes MoBat

Das Projekt „MoBat“ (Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik) wurde Anfang 2021 abgeschlossen. Ziel war die Entwicklung eines modularen Hochleistungsbatteriesystems, welches durch Skalierbarkeit für verschiedenste Anwendungen genutzt werden kann. Voraussetzung für einen praktischen Einsatz ist die Bereitstellung von Schnellladesystemen bestehend aus Hochleistungsbatterien mit kompatibler Ladetechnik. Des Weiteren sind für Schnellladungen hohe Stromstärken erforderlich. Zum einen bestanden die Herausforderungen im Bereitstellen hoher elektrischer Leistungen mit einer neu entwickelten, angepassten Ladetechnik, zum anderen in den mit Schnellladungen verbundenen extremen elektrischen und thermischen Belastungen der verwendeten Batterien. Darüber hinaus war die damit einhergehende Sicherheits- und Lebensdaueroptimierung Bestandteil der Arbeiten. Vorrangig wurde das Zusammenwirken von vergleichsweise kleinen, aber besonders leistungsstarken Lithium-Batterien und effizienter Ladetechnik optimiert. Dadurch ließen sich gezielt die Vorteile für den Einsatz einer Schnellladestrategie in Hochleistungsanwendungen, zum Beispiel für Elektrobusse und andere Heavy-Duty-Anwendungen, herausarbeiten.

Projektpartner

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



Abbildung 1: Während der Projektlaufzeit entwickelter Prototyp des modularen Hochleistungsbatteriesystems [Quelle: AKASOL GmbH].

Ergebnisse Gesamtprojekt

Im ersten Arbeitspaket war vor allem die konzeptionelle Entwicklung der Batteriemodule und -tröge, welche unter Beteiligung von vier Projektpartnern vorgenommen wurde, von Bedeutung. Die Umsetzung des erarbeiteten Konzeptes fand dabei unter besonderer Beachtung des Brandschutzes statt. Dabei wurden grundlegend zwei Linien durch den Hersteller der Batterietröge, die AKASOL AG, verfolgt. Eine konventionelle Lösung, die während der Projektlaufzeit innovativ verbessert wurde sowie eine Vorstudie mit einem Rundzellenmodul. Die Umsetzung erfolgte an der konventionellen Lösung, deren Energieinhalt und Leistungsfähigkeit durch die Nutzung neuer Zellen im herkömmlichen Format erhöht werden konnten. Um den damit einhergehenden Verlust an Sicherheit kompensieren zu können, war die Einbringung von Brandschutzlösungen auf allen Systemebenen wichtig. Für die Überwachung zentraler Betriebsdaten mittels des Einsatzes faseroptischer Sensoren wurden die Voraussetzungen diskutiert und geschaffen. Beides hatte unmittelbare Folgen für die Fertigung der Systeme. Während der Fertigungsphase wurden nützliche Brandschutzkonzepte wie die Verwendung von EneX-Zwischenlagen und Schadgasfiltern in das System eingebracht. Die Fertigung der Prototypen für die experimentelle Anwendung wurde von drei Projektpartnern in Zusammenarbeit durchgeführt. Am Standort in Goslar erfolgten zum Projektende letzte Abstimmungsarbeiten zur Integration in die experimentelle Umgebung, sodass ein fertiges modulares Batteriesystem bestehend aus zwei Batterietrögen für Testreihen zur Verfügung stand. Zur Auslegung solcher modularen Batteriesysteme wurden Kriterien identifiziert, welche die technischen und ökonomischen Restriktionen von Anwendungen berücksichtigen. Diese wurden in ein Planungstool überführt.

Um den stabilen und langfristigen Betrieb des faseroptischen Batteriemanagementsystems sicherstellen zu können, wurde innerhalb der Projektlaufzeit die Abstimmung der Datenauswertung auf die Sensortechnik verbessert. Ergebnis der Arbeiten ist ein geringeres Rauschniveau bei der Aufzeichnung der Signale. Weiterhin wurde eine Anpassung der Leistungsfähigkeit für die Datenaufzeichnung der wesentlichen Messwerte im Betrieb vorgenommen. Damit konnte ein photonisches Messsystem zur Verfügung gestellt werden, welches hinsichtlich der Messqualität zur elektrischen Technologie ebenbürtig ist. Durch den Einsatz kleinerer Bauteile und die Einsparung des optischen Schalters konnten entscheidende Verbesserungen in Bezug auf die Größe der Messeinheit erreicht werden. Dabei stand die Anpassung des Systems an die Anforderungen aus dem Betrieb im Vordergrund der Arbeiten. Eine Validierung des faseroptischen Managementsystems fand in Leistungsversuchen statt. Die Ergebnisse aus den folgenden Abuse-Versuchen wurden entsprechend eingeordnet. Als Ergebnis steht ein parallel zur konventionell verwendeten Technik laufendes System zur Überwachung von Temperatur und Dehnung zur Verfügung, welches mit dem konventionellen BMS gekoppelt ist und bei sicherheitskritischen Zuständen das gesamte System abschalten kann.

Im Rahmen von Versuchen wurden auf verschiedenen Ebenen des Batteriesystems Vermutungen aufgestellt und überprüft sowie in einem zweiten Schritt auf die anderen Ebenen des Systems skaliert. Diese Skalierung wurde in praktischen Versuchen verifiziert oder nach Auswertung von Messergebnissen an die jeweilige Ebene so angepasst, dass nutzbringende Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Evaluation der Ladealgorithmen fand in einer ersten Stufe an zwei unterschiedlichen Zellformaten statt, die beide für die Verwendung im Projekt in Frage kamen. So konnten Risiken, die bei Anwendung von innovativen Ladeverfahren entstehen können, durch die Größe der getesteten Einheiten reduziert werden.

Darüber hinaus waren auf diesem Weg lokale Phänomene überprüfbar. Aus dem Vergleich der beiden Ladeverfahren, klassische CCCV-Ladung und Pulsladung, ging das Pulsladeverfahren unter dem Aspekt der Schnellladung zur Reduktion der Ladedauer als am besten geeignet hervor. Mit entsprechend hoher Stromrate (5C) konnte die Ladezeit für eine vollständige Ladung der Zelle auf unter 17 Minuten redu-

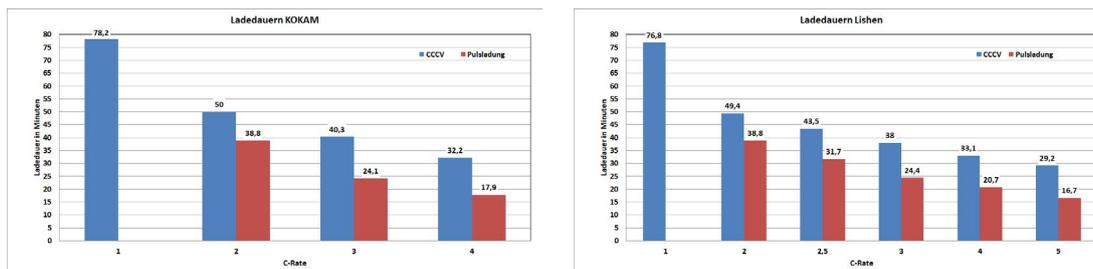


Abbildung 2: Vergleich der Ladedauern über C-Rate zwischen Standard- und Puls-ladeverfahren für die LISHEN-Zelle (links) und die KOKAM-Zelle (rechts).

ziert werden (Abbildung 2). Das ausgewählte Ladeverfahren wurde im Anschluss auf die Modul- und Batterieebene skaliert. In den folgenden Testreihen wurde die Homogenität des Verhaltens der Einzelzellen im Modul und auf Batterieebene betrachtet. Die Ergebnisse belegen eine homogene Verteilung der Temperaturen in der Batterie. Dabei kommt es zu Abweichungen von maximal 4 K zwischen den Zellen bei höchster getesteter Ladeleistung bei Verwendung der Flüssigkeitskühlung. Durch die schrittweise Erhöhung der Laderate auf 2,5C für das gesamte Batteriesystem konnte die Ladedauer um mehr als 30 % auf 25 Minuten gesenkt werden. Somit wurde das Projektziel einer Ladedauer für eine vollständige Ladung von unter 30 Minuten deutlich übertroffen. Darüber hinaus wurde für den Fall des Zwischenladens (oppertunity charging) eine Reduktion der Ladedauer von 60 % für das SOC-Fenster von 80 bis 100 % erreicht.

Ein zentrales Arbeitspaket war die Überprüfung der Modulsicherheit im Fehlerfall. Zur Erfüllung des Arbeitspaketes wurden im Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) verschiedene Arbeiten zur Planung der Versuche vorgenommen. Darüber hinaus hatte das EST in diesem Arbeitspaket eine koordinierende sowie unterstützende Funktion inne. Diese

erstreckte sich auf die Vorschläge zur Durchführung, Bereitstellung der Testinfrastruktur im Batterietestzentrum der TU Clausthal (BSTZ), Begleitung der Tests sowie die Vor- und Nachbereitung der Tests im BSTZ. Die Abuseversuche im BSTZ waren auf die Modulebene beschränkt und hatten zur Aufgabe, die Wirksamkeit von Zwischenlagen aus einem bestimmten Brandschutzmaterial in Bezug auf die thermische Propagation im Modul nachzuweisen. Ähnliche Versuche, die das gleiche Ziel auf Ebene der Systeme (Tröge) verfolgten, wurden parallel von der AKASOL AG durchgeführt. In beiden Fällen konnte die thermische Ausbreitung zumindest verzögert werden. Im Fall des Moduls wurde die Propagation komplett gestoppt.

Demnach kann durch das Brandschutzmaterial bei entsprechender Einbringung einer ausreichenden Menge die thermische Ausbreitung und somit das Havarieverhalten von Batteriesystemen gezielt beeinflusst werden (vgl. Abbildung 3). Anschließend wurden die Ergebnisse mit den beteiligten Partnern diskutiert und veröffentlicht. Durch das von der Firma Stöbich technology GmbH verwendete Filtermaterial konnte die Schadstofflast in der Umgebung von havarierten Modulen deutlich reduziert werden, sodass die IDHL-Werte (Immediately Dangerous to Life and Health) eingehalten werden konnten.



Abbildung 3: Modul ohne Brandschutzlagen (links) mit Brandschutzlagen (rechts) nach Abuse-Test mit Initialisierung durch das gezielte Überladen einer Zelle im mittleren Bi-Pack.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:
Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit sicherer Schnellladetechnik -MoBat-

Fördermittelgeber:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Förderkennzeichen:
03ET6107A

Laufzeit des Vorhabens:
01.11.2016–31.07.2020

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

Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. Alexander Oberland,
Marcel Thiele, M.Eng.



Hans-Peter Beck



Alexander Oberland



Marcel Thiele



Abbildung 4: Gesamtsystem im Batterietestzentrum.

Dies wurde auf Ebene von Zellen und Modulen in verschiedenen Versuchen nachgewiesen. Nach Bewertung aller Versuche ist ein kombiniertes Konzept aus Brandschutzlagen, Brandschotten und Schadgasfiltern zur optimalen Absicherung der Batterien geeignet. Verbesserungen an einzelnen Bestandteilen des Konzeptes, wie beispielsweise am Schadgasfilter, konnten durch entsprechende Versuche mit eigens entwickelter Testumgebung nachgewiesen werden.

Nach der Ermittlung des Arbeitsbedarfs durch eine Analyse der Anforderungen an die Ladetechnik, die sich aus der Anwendung ergeben, erfolgte der Abgleich dieser Anforderung für den Pantographen mit zwei bestehenden Lösungen der Schunk Transit Systems GmbH. Die Analyse ergab, dass der Dachladestromabnehmer besser für eine Anpassung an die Anforderungen geeignet ist. Deshalb wurde diese Variante als Lösung innerhalb des Projektes favorisiert. Der Abnehmer stellt die zentrale Komponente zur Leistungsübertragung dar. Nach Erfüllung der technischen Voraussetzung trat die Reduktion von Kosten innerhalb von Fertigung und Montage in das Zentrum der Arbeiten. Dieses Ziel wurde durch ein verbessertes fertigungs- und montagegerechtes Design erreicht. Beispiele dafür sind die Reduktion der Kontaktflächen und der Einsatz von verschiedenen Beschichtungsmaterialien. Die Auswirkungen dieser Designanpassung auf Ergebnisse des Belastungstests wurden ebenfalls dokumentiert.

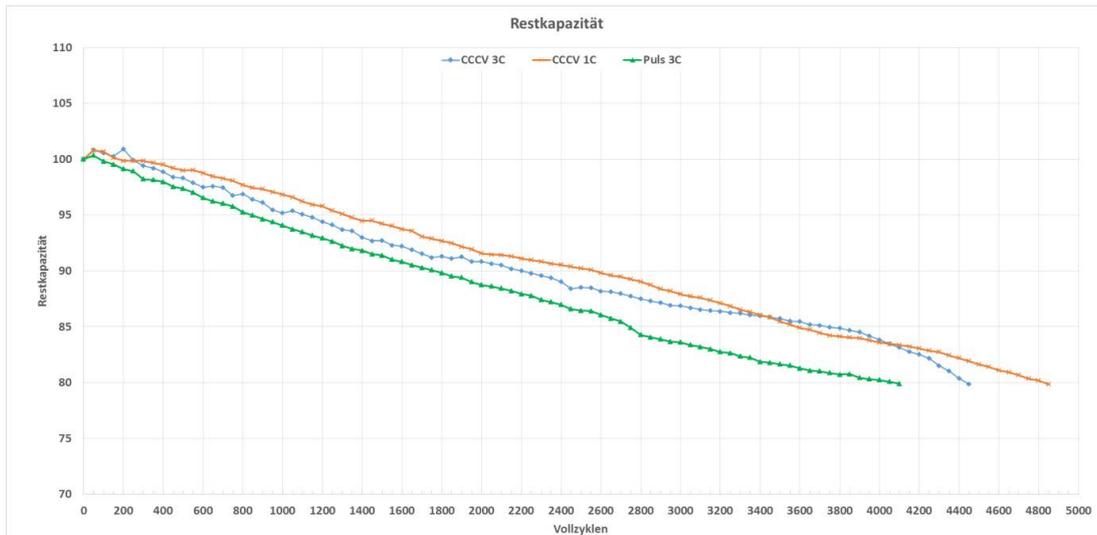


Abbildung 5: Darstellung des Kapazitätsverlusts verschiedener Ladeverfahren über die durchlaufenen Vollzyklen.

Federführend wurde die Installation des Demonstrator-Systems in eine Testumgebung des EST bearbeitet. Die Errichtung der Anlage war Voraussetzung für die Stromtragfähigkeitstests des Dachladestromabnehmers und die Ladetests am Batteriesystem. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Schunk Transit Systems GmbH und AKASOL AG wurde ein Demonstrator im BSTZ aufgebaut, der aus einem Hochleistungsladesystem, einer modular aufgebauten Batterie mit entsprechenden Kommunikations- und Sicherheitseinrichtungen, besteht.

Durch zahlreiche Versuche in dieser Testumgebung konnten viele Erkenntnisse für die Schnellladung des Batteriesystems und die Stromtragfähigkeit des Dachladestromabnehmers über die vorher geplanten höchsten Ladeleistungen hinaus gesammelt werden. Während der Projektlaufzeit stiegen die Anforderungen immer weiter hin zu höheren Leistungen. Um die geforderte Leistung erbringen zu können, wurde ein Prüfstand mit einer maximalen Leistung von bis zu 1,2 MW verwendet. Dieser wurde während der Projektlaufzeit so angepasst, dass im Demonstrator-System eine Leistung von 600 kW für die

Versuche zur Stromtragfähigkeit des gesamten Konzeptes verwendet werden konnte. Damit wurde die im Antrag angestrebte Leistung für den Demonstrator nicht nur erreicht, sondern verdoppelt. Die Testreihe endete mit einem sehr positiven Ergebnis und der Bestätigung, dass das im Projekt aufgebaute und weiterentwickelte Ladesystem alle Anforderungen bei einer maximalen Ladeleistung von bis zu 600 kW erfüllt. Ein weiteres Ergebnis der Arbeiten aus dem Projekt ist neben den erfolgreichen Tests eine Anforderungsliste, welche sich aus dem Zusammenspiel von Aktivitäten in der Normungsgruppe durch die Schunk Transit Systems GmbH und den Resultaten aus dem Testfeld ergaben.

Zentral für das letzte Arbeitspaket des Projektes waren die Lebensdaueruntersuchungen. Dabei wurden die Langzeituntersuchungen auf Ebene der Einzelzellen mit verschiedenen Ladeverfahren durchgeführt und ausgewertet. Anschließend wurden die Ergebnisse auf die Batteriemodule und -systeme übertragen. Die Übertragbarkeit bezüglich der Lebensdauer wurden durch die Verwendungen von Batteriemodellen hinsichtlich der Veränderungen von elektrochemischen Eigenschaften gestützt.





WISSENSTRANSFER IN DIE PRAXIS

4.

Batteriesicherheitsforschung für die Praxis

Seit Aufnahme der strategischen sicherheitsbezogenen Batterieforschung im Batterie- und Sensoriktestzentrum in den Jahren 2015/2016 sowie dem Aufbau des Netzwerkes „Batteriesicherheitscampus Deutschland“ wurden die diesbezüglichen Forschungsaktivitäten des EST und dessen Forschungspartner vor Ort, dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI-FS), auch im zurückliegenden Berichtszeitraum weiter ausgebaut. Neben der Bewilligung neuer Forschungsprojekte, wie sie in diesem Bericht bereits an anderer Stelle beschrieben werden, gingen damit auch wesentliche Erweiterungen und Änderungen der apparativen Forschungsumgebung einher.

So erhielt das EST gemeinsam mit dem HHI-FS zum Ende des Jahres 2021 im Rahmen der Bundesinitiative „Forschungsfabrik Batterie“ den Förderbescheid für eine umfassende Erweiterung der Experimentalumgebung im Batterie- und Sensoriktestzentrum auf dem EnergieCampus Goslar. Mit den geplanten Investitionen in neue Test- und Sensorikanlagen lassen sich zukünftig Batteriemodule aus neuartigen Hochleistungszellen unter klimatisch kontrollierten Umgebungsbedingungen und mithilfe anwendungsgerechter Strombelastungsprofile

durch Impedanzmessungen und faseroptischer Analysen hinsichtlich ihres Zustandes auf Modul- und Einzelzellebene umfassend charakterisieren. Durch diese Zusammenführung elektrischer und optischer Messverfahren soll ein deutlich höherer Detailgrad in der Abbildung der Batteriezustandseigenschaften erreicht werden. Die neuen Anlagen verfügen auch über ein System zur Bewältigung etwaiger Havarien in untersuchten Batteriezellen bei Analysen außerhalb der Spezifikationen. Der Impuls für diese Antragstellung ging, neben dem eigenen Erkenntnisinteresse, auch von Anfragen aus der Industrie nach derartigen Testmöglichkeiten aus. Demnach bieten diese Erweiterungen der Infrastruktur bereits auf dieser frühen Entwicklungsstufe erhebliches Potenzial für eine den Aufbau flankierende Entwicklung neuer Forschungsprojekte in Kooperation mit interessierten Praxispartnern.

Eine auf längere Sicht angelegte strategische Kooperation wurde mit der Freiwilligen Feuerwehr Goslar eingegangen. In Folge ihres technologischen Fortschritts konnten sich Lithium-Ionen-Batterien in vielfältigen – meist mobilen – Anwendungen des Alltags (z.B. digitale mobile Endgeräte, Power Tools, Elekt-



Abbildung 1: Neues Batterietestzentrum des EST und HHI-FS am Bollrich in Goslar. Brandofen und Abgasreinigung befinden sich im mittleren Teil des Gebäudes (Quelle HHI).



Abbildung 2: Laborzellen (El-Cell©) zur elektrochemischen Charakterisierung von Batteriematerialien unter Beachtung der Halbzellpotentiale.

roroller, Elektro-Pkw etc.) gegenüber anderen Speichern und Energieträgern durchsetzen. Den vorteilhaften elektrischen Eigenschaften dieser Systeme steht im Schadensfall das Risiko einer explosiv-exothermen Freisetzung der gespeicherten Energie entgegen. Konzept- und bauartbedingt gestaltet sich die Havariebekämpfung durch die Einsatzkräfte in der Praxis jedoch häufig schwierig, da Möglichkeiten zum Sauerstoffentzug und zur Kühlung stark eingeschränkt sind. Bei der Wahl der angemessenen Einsatzstrategie hat die Feuerwehr Goslar systematische Defizite im Verständnis dieser Energiespeicher sowie der hiervon potenziell ausgehenden Risiken festgestellt. Auch verfügbare Informations- und Schulungsunterlagen konnten bislang keine Abhilfe schaffen, da diese entweder zu pauschal und/oder lediglich auf Elektrofahrzeuge zugeschnitten waren. Daher werden die Freiwillige Feuerwehr Goslar und die Arbeitsgruppen des EST in den kommenden Jahren aktuelle Fragenstellungen aus der Praxis diskutieren und u.a. entsprechende taktische Handlungsanweisungen entwickeln, welche im Anschluss anderen Wehren und Ausbildungseinrichtungen, wie z.B. dem Niedersächsischen Landesamt für Brand- und Katastrophenschutz (NLBK), zur Verfügung gestellt werden.

Mit dem im Jahr 2021 begonnenen Aufbau des Wasserelektrolyse-Technikums im Projekt „Stack Revolution“ und der vorgenannten anstehenden Erweiterung der Infrastruktur im Batterietestzentrum sind ferner weitere räumliche Veränderungen verbunden. So nahmen die thermischen Versuchsanlagen des Batterietestzentrums Ende des Jahres 2021 ihren Betrieb an einem neuen Standort in unmittelbarer Nähe des EnergieCampus Goslar auf. Am Standort der ehemaligen Erzaufbereitungsanlage der Preussag AG am Bollrich betreiben EST und HHI-FS seitdem eine Versuchsanlage für sicherheitskritische Untersuchungen von Hochleis-

tungsbatterien im Modul- und Systemmaßstab, die insbesondere auch aufgrund der Technologieentwicklung der vergangenen Jahre und zahlreicher externer Testanfragen am bisherigen Standort nicht mehr durchgeführt werden konnten. Der neue Standort dient ferner als ein Pilotprojekt für eine zukünftig CO₂-neutrale Versuchsanlage. Im Sinne der „Circular Economy“ wird in einem ersten Schritt eine elektrische Energieversorgung aufgebaut, welche auf der Nutzung aufbereiteter Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern in ihrem zweiten Lebenszyklus beruhen wird (siehe Abbildung 1). Neben dem praktischen Erfordernis – der Standort verfügt über keinen Anschluss an die öffentliche Energieversorgung – ermöglicht dieser Ansatz auch die unmittelbare Umsetzung der gewonnenen Ergebnisse zur theoretischen und evidenzgeleiteten Charakterisierung von Lithium-Ionen-Batterien nach ihrem ersten Lebenszyklus in die Praxis. Auf diese Weise kann dieses Konzept auch eine Referenz für weitere Liegenschaften der TU Clausthal darstellen und dort entsprechend adaptiert werden.



Abbildung 3: Lebensdauer- und Performanceuntersuchungen von 18650-Rundzellen (oben) und verspannten prismatischen Zellen (Zellen) in einem Temperierschrank mit erhöhten Sicherheitsanforderungen.

GET H2 – Initiative für den Aufbau einer bundesweiten H2-Infrastruktur

Die TU Clausthal ist Partner der Initiative GET H2 (www.get-h2.de), an der Unternehmen wie z.B. RWE Generation SE, Siemens, innogy Gas Storage NWE GmbH, BP Europa SE, OGE und Nowega GmbH beteiligt sind. Ziel der Initiative ist es, die Energiewende mit Elektrolyse-Wasserstoff als regenerativen stofflichen Energieträger voranzubringen und eine bundesweite Wasserstoffinfrastruktur zu etablieren (vergleiche Abbildung 1).

Hinter der Initiative stehen Unternehmen und Institutionen, die sich aktiv für die Schaffung eines wettbewerbsorientierten Wasserstoffmarktes und für die dazu notwendigen Anpassungen der gesetzlichen und regulatorischen Grundlagen einsetzen. In mehreren Projekten treiben die Partner der Initiative die Entwicklung entsprechender Technologien sowie ihre Markteinführung voran und planen die Realisierung von Infrastrukturen zu Produktion, Abnahme, Transport und Speicherung von grünem Wasserstoff (H₂).

Das Thema „Regenerativer Wasserstoff“ im zukünftigen nachhaltigen Energiesystem wird an der TU Clausthal disziplinenübergreifend u.a. an den Instituten für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, Elektrische Energietechnik und Energiesysteme sowie für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik erforscht. Dabei wird für die Wasserstoffspeicherung auf die Erfahrung aus dem Fluid-Bergbau (z.B. Institute of Subsurface Energy Systems oder Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik) zurückgegriffen. Zur Einbindung von Wasserstofftechnologien in den regulatorischen Rahmen bzw. zur Erforschung neuer rechtlicher Rahmenbedingungen verfügt das Institut für deutsches und internati-

onales Berg- und Energierecht über umfangreiche Vorarbeiten.

Disziplinübergreifend wird das Thema schwerpunktmäßig im Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST), mit den Clustern „Systemintegration“, „Materialfunktionalisierung“ und „Energiewandlung und -speicherung“ sowie dem Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC) in allen Aspekten der Wasserstoffgewinnung, -konversion und -rückverstromung anwendungsnah bearbeitet, wobei die Stoff- und Energiekopplung („Power to Gas“) im Vordergrund steht. Hier sind vor allem die Abteilungen Abwasserverfahrenstechnik (Wassermanagement des Gesamtsystems), Chemische Energiesysteme (Dynamik der Elektrolyse und Untergrundspeicherung), Thermische Prozesstechnik (regenerative CO₂-Separierung aus MVA-Anlagen sowie die dazugehörigen Gasaufbereitung für die Power to Liquid/Chemicals-Anwendung) und Energiesystemintegration (Konzeptionierung z.B. von regenerativen Speicherkraftwerken) des CUTEC zu nennen. Am Drilling Simulator Celle (DSC) wird ein Beitrag zur Realisierung der „Energiewende“ durch Hochtechnologie-Forschung im Bereich der effizienten und umweltfreundlichen Erschließung des geologischen Untergrunds durch anwendungsbezogene Forschungsarbeiten unterstützt. Allgemein kann festgestellt werden, dass die TU Clausthal aufgrund der historisch gewachsenen Strukturen im Bereich der Stoff- und Energiekopplung einen essentiellen Forschungsbeitrag zur Realisierung der dritten Säule der Energiewende (neben Effizienzsteigerung und Bereitstellung regenerativer Energieträger) mittels Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft über die Initiative GetH2 leisten kann.

Energiesystem heute

Trotz des Ausbaus von Erneuerbaren Energien speist sich das **Energiesystem in Deutschland** nach wie vor zu großen Teilen aus nicht regenerativen Quellen.

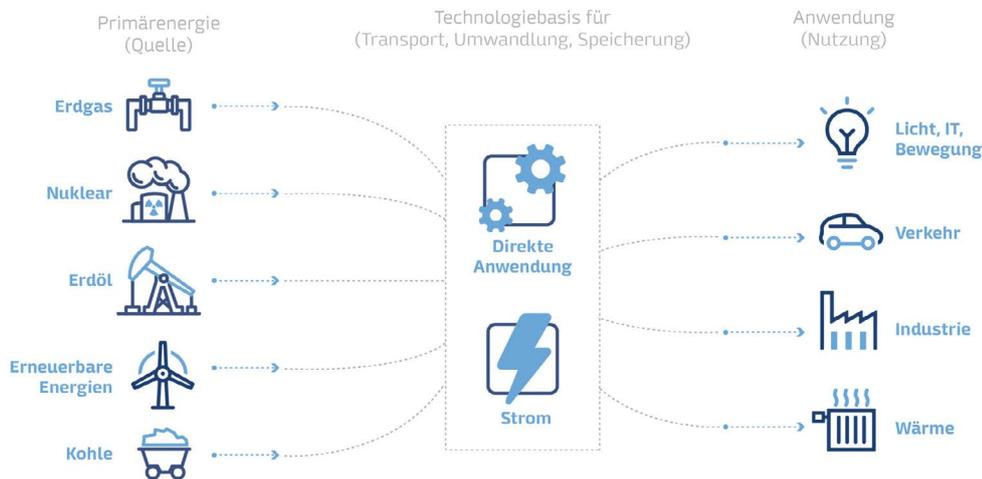


Abbildung 1: „Energiesystem heute“ (Quelle: Initiative – GET H2, www.get-h2.de/#initiative).

Energiesystem morgen

Unsere Vision ist es, **Wasserstoff** als **zweite zentrale Technologiebasis** zu etablieren. Der Großteil der Energie wird dabei aus Erneuerbaren Energien gewonnen.

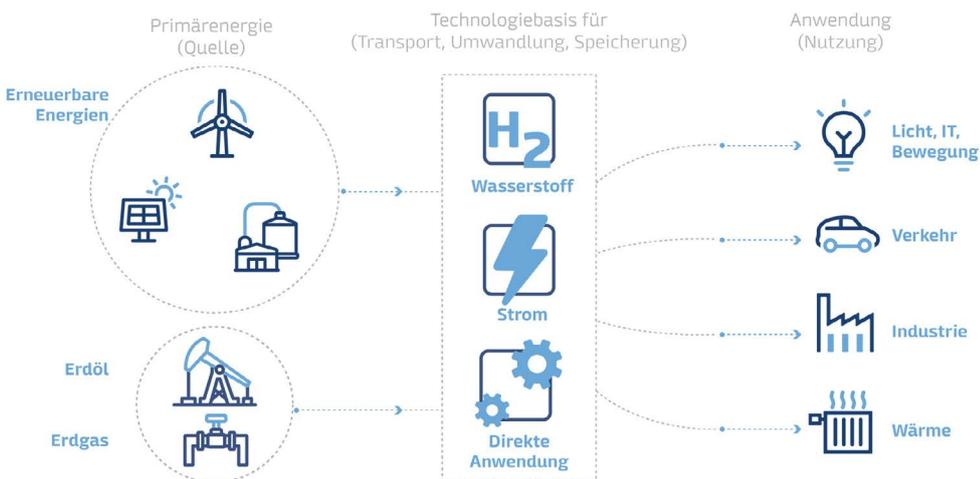


Abbildung 2: „Energiesystem morgen“ (Quelle: Initiative – GET H2, www.get-h2.de/#initiative).

Regionaler Wissenstransfer: Das Unternehmergespräch ENERGIE

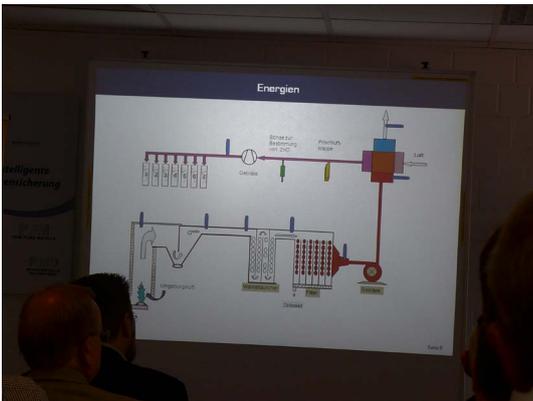
Bereits seit dem Jahr 2009 organisiert die Energie Ressourcen Agentur (ERA) Goslar das Format Unternehmergespräch ENERGIE, seit 2011 in Kooperation mit der Wirtschaftsförderung Region Goslar (WiReGo), und mit Unterstützung der Wirtschaftsförderung der Stadt Goslar. Hervorgegangen aus früheren Aktivitäten zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz von Unternehmen, hat sich dieses Veranstaltungsformat in der Region mittlerweile zu einer wichtigen Dialog- und Austauschplattform für Fach- und Führungskräfte aus der Praxis in den Themenfeldern Energie- und Ressourceneffizienz entwickelt. Erklärtes Ziel dieser Veranstaltung ist es, stets neueste Informationen zur ressourcenschonenden und wirtschaftlichen Nutzung von Energie- und Stoffströmen zu liefern, über aktuelle Fördermöglichkeiten zu informieren sowie anhand von Best-Practise-Beispielen den Austausch unter den Unternehmerinnen und Unternehmern in der Region zu stärken.

Neben regionaler und überregionaler Expertise und praktischer Erfahrungen von Fachleuten aus Unternehmen, Wirtschaftsförderung, Verwaltung, Fachagenturen und Beratungsun-

ternehmen etc. hielten von Beginn der Unternehmergespräche an stets auch aktuelle und praxisrelevante Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Forschung Einzug. Dieser enge Austausch zwischen in der Region verankerten Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen hat sich im Laufe der Jahre zu einem Alleinstellungsmerkmal dieses Veranstaltungsformates entwickelt. Aufgrund dieser Tatsache und der bereits langjährig erfolgten inhaltlichen Unterstützung erschien es nur folgerichtig, dass zum Jahreswechsel 2019/2020 das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) der TU Clausthal in den Kreis der Organisatoren aufgenommen wurde. Die Beteiligung des EST stellt damit einen weiteren Baustein der Aktivitäten im Bereich des regionalen Wissens- und Technologietransfers dar. In idealer und niedrigschwelliger Weise können so aktuelle Forschungsergebnisse in das regionale Innovationssystem kommuniziert und parallel auch unmittelbare praxisrelevante Forschungsbedarfe aufgegriffen werden. Zielte das Unternehmergespräch ENERGIE zunächst vorrangig auf einen Austausch auf der Fachebene, steht es mittlerweile auch der interessierten Öffentlichkeit als Informations- und Diskussionsplattform offen.



Impressionen vom Unternehmergespräch Energie.



Second-Life-Lithium-Batterien und Photovoltaik für saubere Energie in Sub-Sahara Afrika

Die United Nations Economic Commission for Africa (UNECA) schätzt, dass etwa 86 Prozent der ländlichen Bevölkerung in Sub-Sahara Afrika keinen regelmäßigen Zugang zu Elektrizität haben. Die Verfügbarkeit von Elektrizität ist aber nicht nur eine wesentliche Grundvoraussetzung für die erfolgreiche wirtschaftliche Entwicklung einer Region, ohne elektrischen Strom ist auch die Versorgung mit sauberem Trinkwasser nicht möglich. Elektrifizierungsprojekte in Ländern der dritten Welt scheitern häufig an den damit verbundenen Investitionskosten zum Aufbau der Infrastruktur, wie Energiespeichern und Stromnetzwerken.

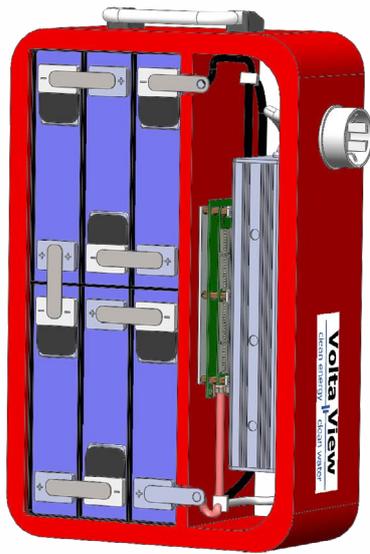
Das EST der TU Clausthal und das Fraunhofer HHI haben hierzu ein containerbasiertes Mini-Grid-System entwickelt, welches auf sogenannte Second-Life-Komponenten sowohl für die Energiespeicher als auch die benötigten Solarpaneele zur Konversion von Sonnenener-

gie in elektrischen Strom zurückgreift. Bevorzugt werden bei diesem Konzept sogenannte B-Ware-Lithium-Ionen-Batteriezellen aus der Automobilindustrie verwendet. Diese haben leichte äußerliche Qualitätsmängel und werden aus der laufenden Produktion ausgemustert, obwohl sie grundsätzlich technisch zu 100 Prozent funktionsfähig sind. Diese Batteriezellen werden vom EST und HHI zu stationären Speichermodulen weiterverarbeitet und anschließend in den Mini-Grid-Systemen als Energiespeicher eingesetzt. Gleiches gilt für die Solarzellen. Diese werden hinsichtlich ihres Wirkungsgrades und elektrischer Anschlüsse getestet und anschließend mit einem Zertifikat versehen, bevor sie als Second-Life-Anwendung in einem Mini-Grid-System eingesetzt werden.

Der vom EST und HHI entwickelte solare Mini-Grid-Container benötigt kein externes Stromnetzwerk, denn die Verteilung der Energie auf



Solarer Mini-Grid Container mit Second-Life-Lithium-Ionen-Energiespeicher zur Versorgung mit sauberer Energie und sauberem Wasser von abgelegenen ländlichen Gemeinden (6 kWp Photovoltaik, 30 kWh Energiespeicher, 2.000 l Trinkwasser/Tag).



Konzept einer mobilen, tragbaren Power Bank mit Second-Life-Lithium-Ionen-Batterien zur individuellen Stromversorgung von ländlichen Haushalten in Sub-Sahara Afrika. Energieinhalt 2kWh, Ausgangsspannung 230V, Gewicht 8,5 kg.

die einzelnen Haushalte erfolgt über modulare und transportable Mini-Energiespeicher (power banks). Der Energieinhalt eines derartigen Mini-Energiespeichers beträgt 2 kWh mit 230 V Ausgangsspannung und versorgt einen typischen Haushalt in Sub-Sahara Afrika etwa 2–3 Tage. Auch diese Energiespeicher verwenden die o.g. Second-Life-Lithium-Batterien; das Laden erfolgt in dem solaren Mini-Grid-Container. Das System ist standardmäßig mit 6 kWp Photovoltaik und 30 kWh Batteriespeicher ausgestattet und liefert in Sub-Sahara Afrika etwa 12.500 kWh elektrischer Energie pro Jahr. Des Weiteren ist der Mini-Grid-Container mit einer Trinkwasser-Aufbereitungsanlage ausgestattet und produziert bis zu 2.000 Liter Trinkwasser pro Tag.

Die ersten Systeme werden im Sommer 2022 sowohl in Gambia als auch in Tansania auf abgelegenen Inseln im Victoriasee installiert.

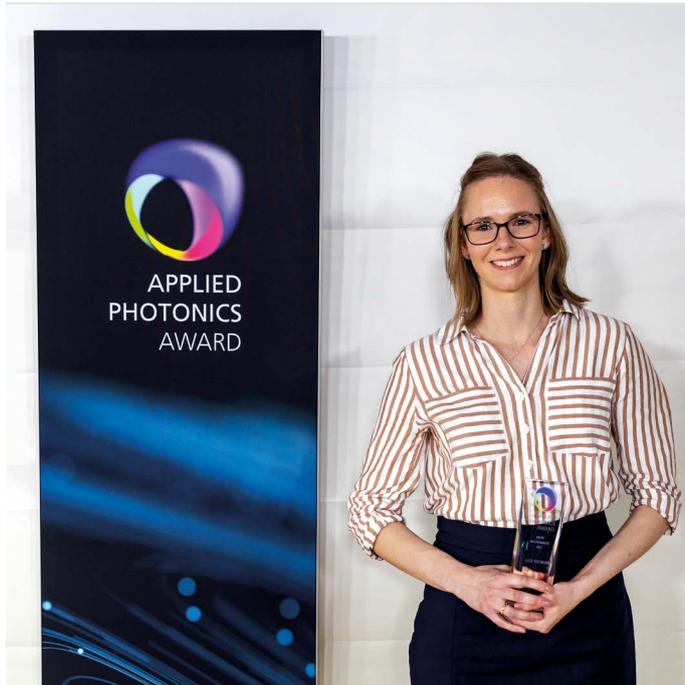
Weitere Informationen zu diesem Projekt: www.voltaview.de





SCHLAGLICHTER

5.



Clausthaler Forscherin gewinnt „Applied Photonics Award 2021“

15.10.2021

Den mit 2000 Euro dotierten Preis erhält Luise Hoffmann für ihre am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal geschriebene Masterarbeit.



Humboldt-Stipendiat erforscht organische Batterien

09.09.2021

Mit einem Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung arbeitet der Mexikaner Dr. Luis Fernando Arenas am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien an der Entwicklung organischer Batterien.



Erwin-Marx-Preis geht an Clausthaler Student

21.07.2021

Jacob Klink erhält die Auszeichnung für die beste studentische Arbeit aus dem Bereich Elektrotechnik sowie eine Prämie von 750 Euro.



Ist Wasserstoff doch die Zukunft? – Prof. Turek im YouTube-Interview

27.07.2020

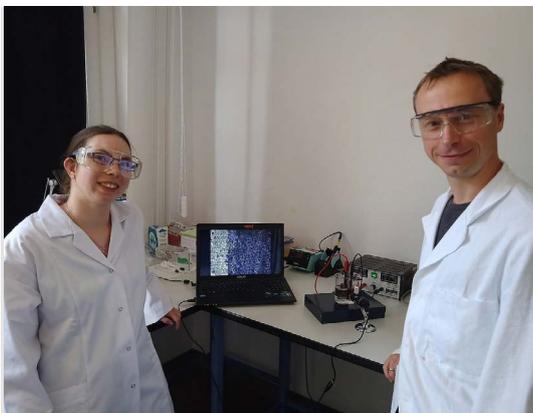
Zum Wintersemester 2020/21 startet der gemeinsam von der Ostfalia Hochschule und der TU Clausthal getragene neue Bachelor-Studiengang "Digital Technologies".



Clausthaler Expertise zur Batteriesicherheit in der Praxis gefragt

05.10.2020

Gemeinsam mit dem Haus der Technik e.V. führten Forscherinnen und Forscher des EST eine Fachtagung zur Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien durch.



Stipendium unterstützt Wasserstoffforschung am EST

25.06.2020

Zum wiederholten Male erhält eine Arbeitsgruppe der TU Clausthal die mit 10.000 Euro dotierte Förderung durch die Max-Buchner-Forschungsstiftung.



Clausthaler Energieforscher im Fernsehen

06.02.2020

SAT.1 regional hat eine Wochenserie zum Thema Wasserstoff mit EFZN-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gedreht. Die Beiträge stehen auch in der Mediathek des Senders.





ANHANG

6.

Publikationen

Bücher

- Weyer, Hartmut und Thore Iversen: Handlungsoptionen zur Gestaltung des regulatorischen und energierechtlichen Rahmens im enera-Projekt: Abschlussbericht: im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten SINTEG-Projekts enera (Förderkennzeichen 03SIN307). 1. Auflage. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), Band 71. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021.
- Weyer, Hartmut und Felix Müsgens: Netzengpässe als Herausforderung für das Stromversorgungssystem: Regelungsfelder, Status quo und Handlungsoptionen. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München: acatech, 2020. <https://edocs.tib.eu/files/e01fn22/1788710754.pdf>.

Beiträge in referierten Fachzeitschriften

- Bauer, Stina, Jan C. Namyslo, Dieter E. Kaufmann und Thomas Turek: „Evaluation of Options and Limits of Aqueous All-Quinone-Based Organic Redox Flow Batteries“. *Journal of The Electrochemical Society* 167, Nr. 11 (Januar 2020): 110522. DOI: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/aba338>.
- Klink, Jacob, Jens Grabow, Nury Orazov, Ralf Benger, Alexander Börger, Annika Ahlberg Tidblad, Heinz Wenzl und Hans-Peter Beck: „Thermal fault detection by changes in electrical behaviour in lithium-ion cells“. *Journal of Power Sources* 490 (2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229572>.
- Flaischlen, Steffen, Martin Kutscherauer und Gregor D. Wehinger: „Local Structure Effects on Pressure Drop in Slender Fixed Beds of Spheres“. *Chemie Ingenieur Technik* 93, Nr. 1–2 (Januar 2021): 273–281. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202000171>.
- Gerloff, Niklas: „Comparative Life-Cycle-Assessment analysis of three major water electrolysis technologies while applying various energy scenarios for a greener hydrogen production“. *Journal of Energy Storage* 43, Nr. 11 (November 2021). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102759>.
- Gerloff, Niklas: „Comparative Life-Cycle Assessment Analysis of Power-to-Methane Plants Including Different Water Electrolysis Technologies and CO₂ Sources While Applying Various Energy Scenarios“. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 9, Nr. 30 (August 2021): 10123-10141. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02002>
- Hoffmann, Viktor, Luise Hoffmann, Wolfgang Schade, Thomas Turek und Thomas Gimpel: „Simple femtosecond laser-based production of enlarged nickel surfaces alloyed with molybdenum, iron and cobalt using aqueous solutions and metal foils“. *Applied Surface Science* 541 (Januar 2021): 148481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148481>.
- Jurtz, Nico, Steffen Flaischlen, Sören C. Scherf, Matthias Kraume und Gregor D. Wehinger: „Enhancing the Thermal Performance of Slender Packed Beds through Internal Heat Fins“. *Processes* 8, Nr. 12 (Januar 2020): 1528. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8121528>.
- Klink, Jacob, Jens Grabow, Nury Orazov, Ralf Benger, Alexander Börger, Annika Ahlberg Tidblad, Heinz Wenzl und Hans-Peter Beck: „Thermal Fault Detection by Changes in Electrical Behaviour in Lithium-Ion Cells“. *Journal of Power Sources* 490 (April 2021): 229572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229572>.
- Liao, Jianxing und Micheal Z. Hou: „Numerical evaluation of hot dry rock reservoir through stimulation and heat extraction using a three dimensional anisotropic coupled THM model“. *Geothermics Volume 83* (Januar 2020).
- Marquardt, Tobias, Jan Hollmann, Thomas Gimpel, Wolfgang Schade und Stephan Kabelac: „Femtosecond Laser-Induced Surface Modification of the Electrolyte in Solid Oxide Electrolysis Cells“. *Energies* 13, Nr. 24 (Januar 2020): 6562. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13246562>.
- Anja-Elsa Polzin, Thomas Gimpel, Stefan Zwosta, Alexander Bomm, Wolfgang Schade und Stephan Kabelac: „Experimental results on two-phase heat transfer enhancement in microstructured corrugated plate heat exchangers“. *Experimental Heat Transfer*, (Januar 2020): 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2020.1822954>.
- Suermann, Michel, Thomas Gimpel, Lena V. Bühre, Wolfgang Schade, Boris Bensmann und Richard Hanke-Rauschenbach: „Fem-

to second laser-induced surface structuring of the porous transport layers in proton exchange membrane water electrolysis". *Journal of Materials Chemistry A* 8, Nr. 9 (Januar 2020): 4898–4910. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9TA12127G>.

Zeitschriftenbeiträge

Weyer, Hartmut: „EU-Strommarktdesign: Rechtsfragen von Knotenpreisen“. *Netzwirtschaften & Recht* 18, Nr. 3/4 (2021): 142–149.

Weyer, Hartmut. „Grundzüge des Redispatch 2.0“. *Recht der Energiewirtschaft*, Nr. 1 (2021): 1–12.

Beiträge in Tagungsbänden

Buchholz, Sebastian, Paul Hendrik Tiemann, Thomas Wolgast, Alexandra Scheunert, Jana Gerlach, Neelotpal Majumdar, Michael H. Breitner, Lutz Hofmann, Astrid Nieße und Hartmut Weyer: „A sketch of unwanted gaming strategies in flexibility provision for the energy system“. In *Community workshop proceedings: energy informatics and electro mobility ict, march 8, 2021: pre-conference 16. international congress on Wirtschaftsinformatik Universität Duisburg-Essen*, herausgegeben von Michael H. Breitner, Sebastian Lehnhoff, Astrid Nieße, Philipp Staudt, Christof Weinhardt und Oliver Werth, 33–39. Oldenburg: BIS-Verl. der Carl von Ossietzky Univ, 2021.

Flaischlen, Steffen, Jan Martin, Bjarne Kreitz, Thomas Turek und Gregor D. Wehinger: „Computational Fluid Dynamics Simulation of CO₂ Methanation in a Fixed-bed Profile Reactor“. In *Computer Aided Chemical Engineering: 30 European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, herausgegeben von Sauro Pierucci, Flavio Manenti, Giulia Luisa Bozzano und Davide Manca, 499–504. Elsevier, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50084-7>.

Scheunert, Alexandra, Jana Gerlach, Michael H. Breitner und Hartmut Weyer: „Datenschutz und Privatsphäre in smarten Stromnetzen: eine interdisziplinäre Analyse und Trends“. In *Community workshop proceedings: energy informatics and electro mobility ict, march 8, 2021: pre-conference 16. international congress on Wirtschaftsinformatik Universität Duisburg-Essen*, herausgegeben von Michael H. Breitner, Sebastian Lehnhoff, Astrid Nieße, Philipp Staudt, Christof Weinhardt und Oliver Werth, 47–53. Oldenburg: BIS-Verl. der Carl von Ossietzky Univ, 2021.

Wussow, Jonas, Lily Kahl, Marc René Lotz, Melanie Hoffmann, Vanessa Beutel, Sebastian Buchholz, Jana Gerlach, u. a.: „SiNED-ancillary services for reliable power grids in times of progressive German Energiewende and digital transformation“. In *ETG-Kongress 2021, 18.–19.05.2021*, online, herausgegeben von VDE ETG, 148–153. Berlin: VDE, 2021.

Beiträge in Sammelbänden

Mohr, Jochen und Hartmut Weyer: *Entwicklungen im Energieregulierungs- und Wirtschaftsrecht: Beiträge zum 80. Geburtstag von Prof. Dr. Gunther Kühne, LL.M.* Veröffentlichungen des Instituts für Energie- und Regulierungsrecht Berlin, Band 71. Frankfurt am Main: Peter Lang, 2020.

Weyer, Hartmut: „Das Zusammenspiel von Stromhandel und Engpassmanagement“. In *Selbstverantwortete Freiheit und Recht: Festschrift für Franz Jürgen Säcker zum 80. Geburtstag*, 709–725. München: C.H. Beck, 2021.

Forschungsdaten

Jacob Klink, Nury Orazov, Jens Grabow und Ralf Benger: „Cell characteristics for 46Ah High Power Kokam Nano Pouch Cell“. *Mendeleev Data*, Oktober 2020. DOI: <https://doi.org/10.17632/G443F7CN7P.1>.

Studentische Studien- und Projektarbeiten sowie Abschlussarbeiten

Basse, J.: „Weiterentwicklung des Elektromobilitätskonzepts von Continental am Standort Regensburg“. Masterarbeit. 2020.

Er, Deniz: „Sicherheitskritische Bewertung von Lithium-Ionen-Zellen unter besonderer Berücksichtigung der Zustandsgröße State of Safety“. Projektarbeit. 2020.

Er, Deniz: „Modellierung eines Lithium-Ionen-Moduls zur Detektion sicherheitskritischer Zellzustände“. Masterarbeit. 2021.

Farhan, A.: „Erstellung und Parametrisierung und Validierung eines Ersatzmodells von Lithium-Ionen-Batterie bei Berücksichtigung eines Lastprofils zur Erbringung der Primärregelleistung“. Masterarbeit. 2020.

Fischer, Lars Henry: „Auslegung eines Batterie- und Wasserstoffspeichers für eine netzdienliche Schnellladestation mit PV-Anlage“. Bachelorarbeit. 2020.

- Haarnagel, Leon: „Analyse der Transportprozesse mittels integrierter Potentialsonden in der Membran von Vanadium-Redox-Flow-Batterien“. Bachelorarbeit. April 2021.
- Hartleb, M: „Untersuchung des Einflusses der anodischen Ruhespannungskennlinie auf die orts aufgelöste Simulation des dynamischen Verhaltens einer Lithium-Ionen-Zelle“. Masterarbeit. 2021.
- Hartmann, Frederik: „Substitution von Blei-Säure-Batterien durch Lithium-Ionen-Batterien für statische USV-Anlagen unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte“. Masterarbeit. 2021.
- Hebenbrock, A: „Development and experimental validation of a combined electric and thermal observer model for application-oriented fault detection on EV-sized modules“. Masterarbeit. 2021.
- Jansen, M: „Entwicklung eines Leitfadens zum Aufbau von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge im öffentlichen und halböffentlichen Betrieb“. Masterarbeit. 2020.
- Klink, Jacob: „Entwicklung einer modellbasierten Methode zur frühzeitigen Erkennung sicherheitskritischer Erwärmung von Lithium-Ionen-Zellen“. Masterarbeit. 2020.
- Meyer, Florian Matthias: „Initiierung und Charakterisierung von internen Kurzschlüssen in Lithium-Ionen-Batterien mit Fokus auf die optische Post-Abuse-Analyse“. Bachelorarbeit. 2020.
- Meyfarth, Anna: „Elektrochemische Untersuchung der Auswirkung verschiedener Wärmeeintragspfade auf den Stabilitätszustand von Lithium-Ionen-Zellen“. Masterarbeit. 2020.
- Mhaidly, Mahmoud und Qusai Jaradat: „Konzeptbewertung von neuartigen Methoden zur internen Kurzschlussenerzeugung bei Lithium-Ionen-Pouchzellen“. Projektarbeit. 2021.
- Reichrath, T: „Vorteile einer Lithium-Batterie im 12 V Bordnetz unter besonderer Berücksichtigung des Motorstarts“. Bachelorarbeit. 2021.
- Sanderbrandes, Lars Hendrik: „Gegenüberstellung von Ladungszustandsmessungen einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie“. Bachelorarbeit. September 2021.
- Sengül, Deniz: „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über die Lebenszeit von Speicher-Umrichter-Systemen zur Erbringung von Momentanreserve unter besonderer Berücksichtigung der Lithium-Ionen-Batteriespeichersysteme“. Projektarbeit. 2020.
- Vorträge**
- Benger, Ralf: „Lithium-Ionen-Batterien – Chancen und Herausforderungen“. Unternehmensgespräch Energie, Goslar, 20.02.2020.
- Benger, Ralf: „Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeicher“. Workshop der EnergieAgentur NRW "Brandschutz bei Lithium-Ionen-Batteriespeichern", 01.09.2021, Essen.
- Deblon, Frank, Steven Reineke, Benjamin Werther, Dirk Turschner, Ralf Benger, Hans-Peter Beck, Michael Schael, Wolfram Kruschel und Thomas Ulbrich: „Implementation and Evaluation of a High-Performance Battery Converter System for Providing Synthetic Inertia at Distribution Network Level“. EPE'21 ECCE Europe23rd European Conference on Power Electronics and Applications, September 2021.
- Flaischlen, Steffen und Gregor D. Wehinger: „Computational fluid dynamics simulation of CO₂ methanation in a fixed bed profile reactor“. Mailand, August 2020.
- Flaischlen, Steffen, Thomas Eppinger und Gregor D. Wehinger: „Meshing of Particle-Particle Contacts in Fixed-Bed Reactors“, Bamberg, März 2020.
- Flaischlen, Stefan, Steffen Lipp, Bjarne Kreitz, Jan Martin, Thomas Turek und Gregor D. Wehinger: „Particle-resolved CFD simulations for diluted catalytic fixed-bed reactors: Methanation of CO₂“. 10. ProcessNet-Jahrestagung und 34. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen, 2020.
- Grabow, Jens, Jacob Klink, Nury Orazov und Ralf Benger: „Early Thermal Runaway detection in lithium ion batteries by using of a coupled electricalthermal plausibility model; Poster“. Münster, März 2020. DOI: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.27557.12007>.
- Dissertationen**
- Maik Becker: „Validation of a two-dimensional model for vanadium redox-flow batteries“. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2020. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), Band 65.
- Feng, Wentao: „Numerical study of the stimulation related thermo-hydro-mechanical processes in tight gas and deep geothermal reservoirs“. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2020. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), Band 64.

Kaiser, Friederike: „Steady state and time dependent compressed air energy storage model validated with Huntorf operational data and investigation of hydrogen options for a sustainable energy supply“. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2020. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), Band 67.

Mehmood, Faisal: „Optimization of hydraulic fracturing in tight gas reservoirs with alternative fluid“. Göttingen: Cuvillier Ver-

lag, 2021. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), Band 70.

Tchoupou Lando, Eric: „Entwicklung eines ereignisbasierten Lebensdauermodells und Validierung der linearen Schadensakkumulationshypothese für NMC/Graphit Lithium-Ionen Zellen“. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), Band 72.

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
Internet: www.est.tu-clausthal.de

Redaktion

Dr. Jens-Peter Springmann

Lektorat

wortschmiedin.de, Sandra Köhler

Layout und Satz

Melanie Exner

Bildnachweis

Adobe Stock: S. 4, 8, 12, 90, 100, 104
Uwe Bellhäuser: Titelbild
Fraunhofer IOF: 102o
Anna Heinichen: S. 103ur
Nadine Kaiser: S. 102ur

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

Druck

Papierflieger Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld

Dieser Bericht ist auf FSC-zertifiziertem
Recyclingpapier gedruckt.

April 2022

www.tu-clausthal.de