



TU Clausthal

EST

Forschungszentrum
Energiespeichertechnologien

Jahresbericht 2022/2023

des Forschungszentrums
Energiespeichertechnologien (EST)



Jahresbericht 2022/2023
des Forschungszentrums
Energiespeichertechnologien (EST)

Inhalt

Entwicklung der Forschungsagenda	5
Entwicklung des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien 2022/2023	6
Geschäftsbericht und Infrastruktur	9
Geschäftsbericht 2022/2023	10
Zukunftsorientierter Ausbau der Batterie-Prüfinfrastruktur am EST	12
Gastwissenschaftler:innen	14
Strategiebildende Forschungsprojekte in den Jahren 2022/2023	17
RiskBatt: Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase	18
GridBatt: Batterietechnologien zur Sicherstellung eines sicheren Netzbetriebs	24
VentBatt: Erhöhung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien durch ein innovatives, ventilgesteuertes Gas- und Thermomanagement	32
CircularLIB: Fibre optical sensors and improved models for state estimation and cell design.....	38
Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden	42
FemtoPEM: Optimierung poröser Transportschichten für die PEM-Elektrolyse mittels Femtosekundenlaser-Oberflächenstrukturierung.....	46
InnoEly: Innovationslabor Wasserelektrolyse: Modellierungs- und Charakterisierungswerkzeuge für die Entwicklung von Wasserelektrolyseuren – vom Material zum System	49
BLaserKat : Blasenablösecharakteristik und Langzeitstabilität von femtosekundenlaserlegierten Elektrokatalysatoren.....	52
H2-Wegweiser Niedersachsen – Teilprojekt energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen	55

Projekt SiNED - Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation – Kompetenzbereich wirtschaftliche und energierechtliche Fragen.....	60
StaR - Stack Revolution	64
MacGhyver: Mikrofluidische Abwasserbehandlung und Erzeugung von grünem Wasserstoff durch elektrochemische Reaktionen	68
Wissenstransfer in die praxis.....	71
Transferaktivitäten im Bereich Batteriesicherheit.....	72
Regionaler Wissenstransfer: Das Unternehmergegespräch ENERGIE	73
H2Goslar – das Wasserstoffnetzwerk im Landkreis Goslar	74
Schlaglichter	77
Anhang	83





ENTWICKLUNG DER FORSCHUNGSAGENDA



Entwicklung des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien 2022/2023

In den vergangenen zwei Jahren hat das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) seine Kernthemen in den Bereichen Wasserstoff und Batterien durch neue Projekte vorangetrieben und dabei insbesondere die Forschungsinfrastruktur am EnergieCampus Goslar wesentlich erweitert.

Ein zentrales Vorhaben im Bereich der Wasserstoffforschung war der Aufbau neuer Testfelder für die Untersuchung von Komponenten der alkalischen Wasserelektrolyse vom Labormaßstab bis zu industriellen Elektrolysestacks. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts „StaR – Stack Revolution“, welches ein Teilprojekt der nationalen Technologieplattform „H2Giga“ darstellt, konnte ein vollständig neu konzipiertes Testfeld mit einer Leistung von bis zu 150 kW trotz erheblicher Nachwirkungen insbesondere der Pandemiewelle nahezu fristgerecht im Frühjahr 2022 fertiggestellt und in Betrieb genommen werden. Aufgrund des erfolgreichen Projektverlaufs wurde die Förderung für das Teilprojekt der Technischen Universität (TU) Clausthal bereits zweimal auf nunmehr über sechs Millionen Euro erhöht. Einen Überblick über die im Berichtszeitraum erzielten Ergebnisse des StaR-Projekts findet sich an anderer Stelle des hier vorliegenden Berichts.

Darüber hinaus wurden die gemeinsamen Arbeiten des EST, des CUTEC-Forschungszentrums weiterer TUC-Institute sowie des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts (HHI) Goslar in den von der Niedersächsischen Landesregierung geförderten und vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) koordinierten „Innovationslaboren Wasserstoff“ erfolgreich fortgesetzt. Über ausgewählte am EST bearbeitete Teilprojekte dieses Verbundes wird ebenfalls in dieser Broschüre berichtet. Die erfolgreiche disziplin- und standortübergreifende Zusammenarbeit mehrerer Universitäten und Forschungseinrichtungen in den Innovationslaboren bildete im Jahr 2023 die Basis für die Entwicklung eines ebenfalls vom EFZN koordinierten Forschungsverbundes „EFZN-Powerhouse“, für den die Niedersächsische Landesregierung den beteiligten niedersächsischen

Hochschulen und Forschungseinrichtungen im Rahmen der Förderlinie „zukunft.niedersachsen“ ein Gesamtvolumen von insgesamt ca. 50 Mio. Euro in Aussicht gestellt hat. Über mehrere Arbeitsgruppen insbesondere des EST und des Forschungszentrums Drilling Simulator Celle (DSC) wird die TU Clausthal wesentlich in den Themenfeldern Ammoniaksynthese und Geoenergiesysteme an diesem Verbund beteiligt sein.

Begleitend zum StaR-Projekt wurde ein Konzept entwickelt, das die Integration des produzierten Wasserstoffs in die bestehende wissenschaftliche und betriebstechnische Infrastruktur des Forschungszentrums vorsieht. Mit einer Kopplung der Sektoren Kraft-Wärme-Kälte-Wasserstoff soll am EST ein vollständiges und nachhaltiges Energiesystem im Realmaßstab nachgebildet werden. Auf diese Weise sollen sowohl das Betriebsverhalten einzelner Erzeugungs- und Speicherkomponenten als auch das Verhalten des Gesamtsystems nachgebildet und optimale Betriebsweisen entwickelt werden. Bei einer positiven Förderentscheidung ist der Projektstart für die zweite Jahreshälfte 2024 geplant.

Im Bereich der Batterieforschung ermöglichte die Bundesinitiative „Forschungsfabrik Batterie“ zusammen mit dem Fraunhofer HHI eine bedeutende Erweiterung der experimentellen Möglichkeiten im Herbst 2023. Wie es an anderer Stelle des Berichts noch näher ausgeführt wird, lassen sich seitdem Batteriemodule aus neuartigen Hochleistungszellen unter klimatisch kontrollierten Umgebungsbedingungen und mithilfe anwendungsgerechter Strombelastungsprofile durch Impedanzmessungen und faseroptische Analysen hinsichtlich ihres Zustandes auf Modul- und Einzelzellebene umfassend charakterisieren.

Neben der Weiterentwicklung der Forschungsagenda in den Schwerpunktthemen Wasserstoff- und Batterieforschung unter Einbeziehung des Querschnittsthemas Materialfunktionalisierung entwickelte sich das EST im zurückliegenden Berichtszeitraum auch in personeller Hinsicht weiter. Mit dem Generationenwechsel an den energietechnisch orientierten Professuren

der TU Clausthal konnten zahlreiche neu berufene Professorinnen und Professoren für die Mitarbeit im Zentrum gewonnen werden. Dies spiegelt sich auch in der Erweiterung und Neu-besetzung des EST-Vorstandes und der zunehmenden Verzahnung mit den Mitgliedern des universitätsweiten Forschungsfeldes „Nachhaltige Energiesysteme“ wider.

Über diese und weitere Aktivitäten des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien in den Bereichen Forschung und Transfer berichten wir ausführlicher im nun vorliegenden Jahresbericht.

Vorstand des EST 2023–2026:

Vorsitzender Mitglieder



Prof. Wolfgang Schade



Prof. Leonhard Ganzer



Prof. Ines Hauer



Prof. Thomas Turek



Prof. Andreas Reinhardt



Heike Stucki-Bammel

Vertreterin
MTV Personal



Dr.-Ing. Ralf Bengler

Vertreter
wiss. Personal

Vertreter
Forschungsfeld
Nachhaltige
Energiesysteme





GESCHÄFTSBERICHT UND INFRASTRUKTUR

2.

Geschäftsbericht 2022/2023

In den Jahren 2022 und 2023 verfügte das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien auf Basis der mit Präsidium geschlossenen Zielvereinbarung über einen jährlichen Etat aus Haushaltsmitteln von ca. 1,5 Mio. € für Personal- und Sachkosten. Dieser konnte im Berichtszeitraum durch budgetwirksame eingeworbene Erträge im jeweiligen Jahr wiederum mehr als verdoppelt werden.

Im Vergleich zu den Vorjahren stach insbesondere der deutliche Anstieg aus Fördermitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) hervor, der im Wesentlichen durch die investiven Maßnahmen im Projekt „StaR – Stack Revolution im bundesweiten Leitprojekt „H2Giga“ sowie dem Ausbau der Forschungsinfrastruktur für Belastungsuntersuchungen an Batteriespeichern im Rahmen des Bundesforschungsprogramms „Batterie2050“ begründet lag. Das mit dieser neuen Infrastruktur einhergehende Projektpotenzial gilt es nun in den kommenden Jahren in neuen Forschungsvorhaben zu realisieren.

Mit der Fortführung der Arbeiten in den vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten „Innovationslaboren für Wasserstofftechnologien“ blieb das Niveau der Sondermittelzuweisungen der Niedersächsischen Landesregierung auf dem

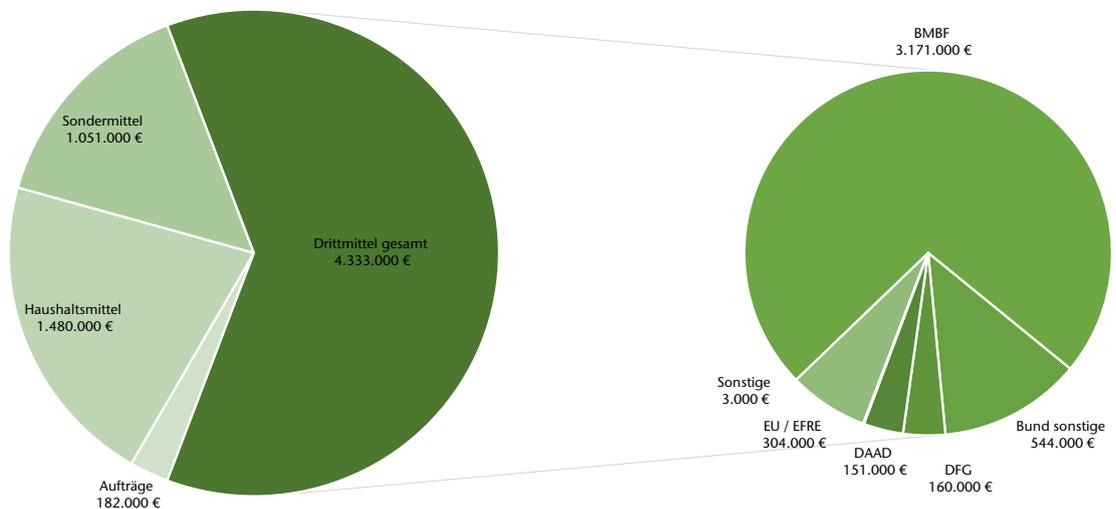
hohen Niveau der Vorjahre. Insbesondere im Zuge der weitgehenden Beteiligung des EST an der vorgenannten niedersachsenweiten Antragsaktivität „EFZN-Powerhouse“ dürfte dieses Niveau auch in den Folgejahren gehalten oder sogar ausgebaut werden können.

Im Berichtszeitraum konnte der Anteil der Industriaufträge leicht auf nunmehr 5% des Gesamtbudgets im Jahr 2023 gesteigert werden, verharnt damit aber noch deutlich unter dem mittleren Niveau der Jahre vor der Coronapandemie. Mit der Fertigstellung der erweiterten Testinfrastruktur des Batterie-Testzentrums Ende 2023 sowie der geplanten Nutzung des Elektrolysetestfeldes auch für kommerzielle Zwecke wird in den nächsten Jahren mit einer positiven Entwicklung hin auf das Niveau der Vorjahre gerechnet.

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

Der Personalbestand des EST war gegenüber den Vorjahren rückläufig, was insbesondere im stellenweisen Einsatz von Personalmitteln aus der Grundfinanzierung für Infrastrukturinvestitionen sowie zur Finanzierung von Eigenprojekten begründet lag. Auch konnten Nachbesetzungen freigewordener Stellen nicht immer

Zusammensetzung des Gesamtbudgets 2022



Mitarbeiter:innen der EST-Geschäftsstelle 2022/2023:

Leitung



Dr. Jens-Peter Springmann
Administrativer Geschäftsführer

Verwaltung



Fee Strahler



Heike
Stucki-Bammel



Nico Rusack

Bibliothek



Nadine
Kleinander



Britta Dethlefs



Kevin Maib



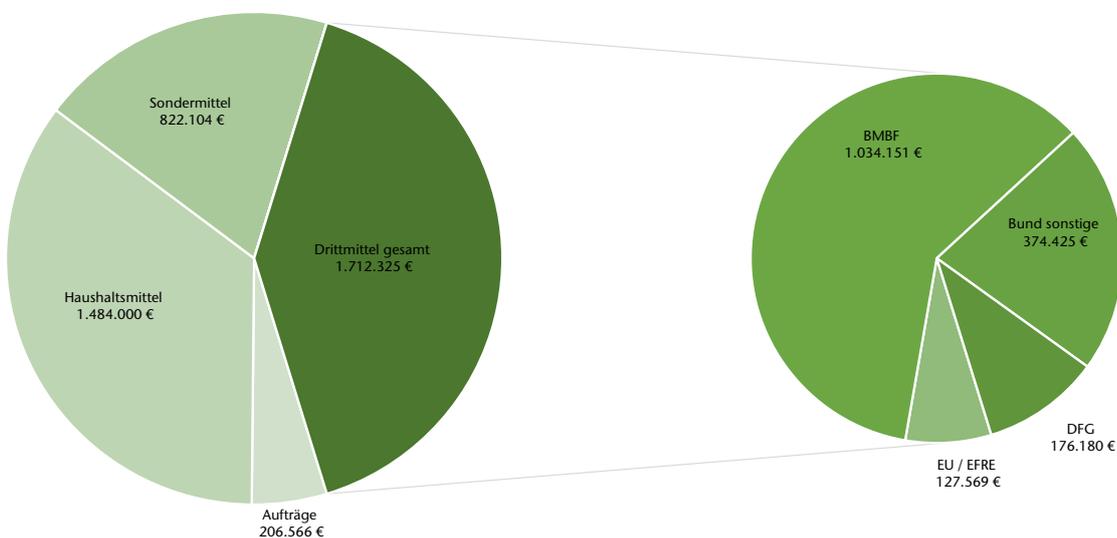
Wolfgang Schrader

Technik

nahtlos erfolgen, was ebenfalls negativ in die Stellenstatistik einfluss. Belief sich der Personalbestand noch auf durchschnittlich 48 Stellen im Jahr 2021, davon 44 Stellen im wissenschaftlichen und 4 Stellen im nicht-wissenschaftlichen

Bereich, waren im Jahr 2023 noch 35 Personen im wissenschaftlichen Dienst und 6 Personen im nicht-wissenschaftlichen Dienst am EST beschäftigt.

Zusammensetzung des Gesamtbudgets 2023



Anmerkung: 2023, vorläufig.

Zukunftsorientierter Ausbau der Batterie-Prüfinfrastruktur am EST

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind immer häufiger in tragbaren Geräten, als Heimspeicher für Solarenergie oder beispielsweise in Elektrofahrzeugen zu finden. Immer größere Anforderungen in verschiedenen und neuen Anwendungen führen zur Entwicklung von Batterien mit immer mehr Leistung und Energieinhalt bei gleichen Volumen und gleicher Masse. So hat sich die Reichweite baugleicher Elektroautos zum Teil innerhalb weniger Jahre verdoppelt. Damit insbesondere bei leistungsfähigen Zellen und Modulen Untersuchungen mit einer relevanten elektrischen Belastung durchgeführt werden können, ergeben sich steigende Anforderungen an die Testinfrastruktur. Für heutige Hochleistungszellen sind Lade- und Entladezeiten im Minutenbereich schon keine Seltenheit mehr – daraus folgt z.B., dass eine 10 Ah-Zelle mit 1000 A belastet werden kann. Das können die meisten Batterietestsysteme nicht mehr leisten. Dieses gilt umso mehr, wenn mehrere Zellen zu Modulen verschaltet werden und die Stromtragfähigkeit dann bei höherer Spannung gewährleistet werden muss.

Auf dem EnergieCampus Goslar ist daher gemeinsam mit dem Projektpartner vom Fraunhofer HHI eine neue Prüfinfrastruktur in Betrieb genommen worden, die die Untersuchung von Batteriemodulen bis zu einer Spannung von 60 V und mit Strömen von mehr als 2000 A ermöglicht. Um eine möglichst hohe Flexibilität zu ermöglichen und auf kommerzielle Systeme zurückgreifen zu können, wird die Stromtragfähigkeit durch das Parallelschalten mehrerer Kanäle hergestellt.

Performance-Prüfungen mit Hochstrombelastungen von (prototypischen) Zellen und Modulen, wie sie aus verschiedenen Forschungsprojekten der beiden Projektpartner des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien (EST) und dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (HHI) vorliegen und sich nicht nur auf die Lithium-Ionen-Technologie beschränken, gehen immer auch mit einer potentiellen Gefährdung einher. Da die Prüflinge zudem unter standardisierten Bedingungen getestet werden müssen, ist neben der elektrischen Infrastruktur auch eine sichere und klimatisierbare Prüfumgebung geschaffen worden. Diese ist entsprechend den Sicherheitsanforderungen mit einem Notabschaltsystem, einer Löschanlage, einer Abführung und Neutralisation von Havariegasen sowie einem Alarm-

system ausgestattet. Die Luftfeuchte und der Temperaturbereich orientieren sich dabei an den Spezifikationsgrenzen von gegenwärtigen Lithium-Ionen-Batterien, wobei auch die zu erwartenden Extrembereiche momentaner und zukünftiger Anwendungsgebiete abgedeckt werden. Leistungsüberprüfungen und Lebensdaueruntersuchungen von Zellen und Modulen erfolgen einhergehend mit der Charakterisierung durch die nach dem Stand der Technik neuesten Analysemethoden.



Abbildung 1: Installation der Prüflinge in der neuen Klimakammer.

Die Prüfstände sind daher jeweils mit einer Einheit zur elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS), die auch die Auswertung harmonischer Schwingungen bei einer Anregung außerhalb des linearen Bereichs erlaubt (Nicht-lineare elektrochemische Impedanzspektroskopie NLEIS), ausgestattet. Damit können bis auf die Einzelzellebene alterungsspezifische elektrochemische Abläufe identifiziert und ausgewertet werden. Mit der neuen Infrastruktur können nun auch modernste Speichertechnologien in ihren elektrischen Grenzbereichen sicher getestet und bewertet werden. Neben LIB lassen sich auch neue Technologien wie etwa Aluminium-Ionen-Batterien sowie sogenannte Superkondensatoren untersuchen. Die Integration mit faseroptischen Sensorsystemen eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, sowohl Zellhavarien frühzeitig zu detektieren als auch Degradationsprozesse zu erkennen. Durch Online-Adaption der elektrischen Belastung an die vorliegende Ausdehnung wird es möglich, neuartige Schnellalgorithmen

nicht nur an die Temperatur, sondern zusätzlich an die mechanische Volumenänderung oder -änderungsrate der Zellen anzupassen. Aus der Kombination von Faseroptischer Sensorik und elektrischen Grenzleistungstests mit leistungsstarken Prüfständen ergeben sich völlig neue Optionen bei der Entwicklung sicherer und hoch performanter Speichersysteme. Um auch größere Batteriezellen und -module in inerter Atmosphäre kostengünstig aufbauen oder modifizieren zu können, ist zudem eine einfache Handschuhbox beschafft worden. Diese ist für den diskontinuierlichen Betrieb ausgelegt und erzeugt damit geringere Betriebs- und Wartungskosten als vergleichbare Systeme.

Der Aufbau der neuen Prüfanlagen mit integrierten Sensorsystemen wurde im Verbundprojekt „HoLiSens“ (FKZ: 03XP0438) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Initiative „ForBatt“ gefördert.

Zur Prüfung von Materialeigenschaften, Performanceuntersuchungen unterschiedlicher Materialkombination und auch der Untersuchung neuer Batterietechnologien wie etwa Aluminium-Ionen-Batterien werden in der Forschung sehr häufig Laborzellen verwendet. Um Experimente in entsprechender Anzahl und unter standardisierten Bedingungen durchführen zu können, ist am EST ein 16-kanaliges Laborzelltestsystem mit integrierter Temperierung beschafft und in Betrieb genommen

worden. Die Finanzierung erfolgte durch den Forschungspool der TU Clausthal und Eigenmittel.

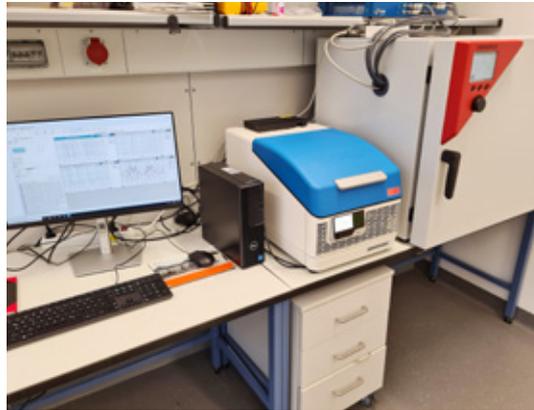
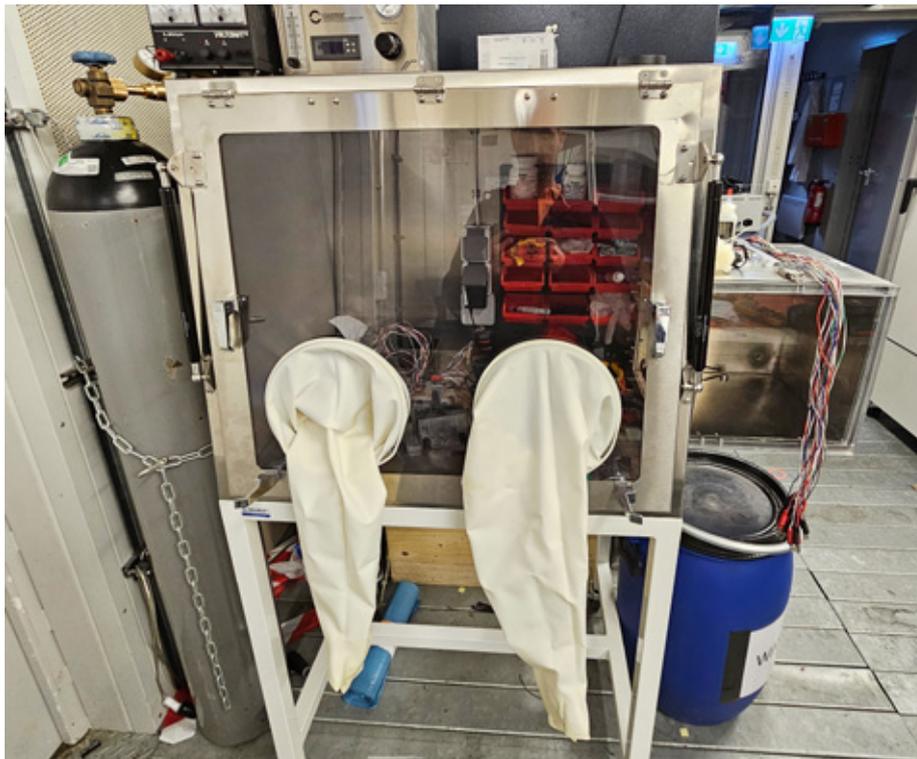


Abbildung 2: Temperaturgeregeltes 16-Kanal-Laborzellen-Testsystem.

Zu weiteren Charakterisierung von Laborzellen, aber auch größerer Zellen oder Module ist ferner ein weiterer modularer Mehrkanalpotentiostat mit Stromverstärker („Booster“) für die Wissenschaftler in die Infrastruktur integriert worden. Somit ist eine leistungsfähige Prüfinfrastruktur von der Laborzelle über kommerzielle Hochleistungszelle und Batteriemodule bis hin zu ganzen Systemen vorhanden, um sowohl standardisierte Performance-Untersuchungen als auch zerstörende Prüfungen durchzuführen.

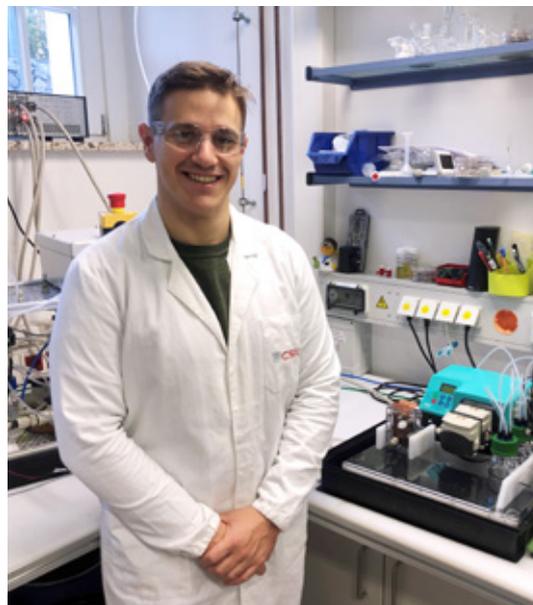
Abbildung 3: Handschuhbox zum Präparieren von Lithium-Ionen-Zellen.



Gastwissenschaftler:innen

Nanostrukturierte Elektroden für leistungsstarke organische Flowbatterien

Das Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT) und das Forschungszentrum für Energiespeichertechnologien (EST) haben eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Kohlenstoffmaterialien (ICB) des Spanischen Nationalen Forschungsrats (CSIC), Saragossa, Spanien, begonnen. Ziel der gemeinsamen Arbeit ist die Bewertung neuartiger nanostrukturierter Materialien als Elektroden auf Kohlenstoffbasis zur Verbesserung von Flowbatterien. Es wird erwartet, dass diese Technologie eine wichtige Rolle bei der Speicherung von erneuerbaren Energien spielen wird. Zu diesem Zweck hielt sich der Doktorand Antonio Jesús Molina Serrano drei Monate lang auf dem Energiecampus Goslar auf, um die Energieeffizienz von Kohlenstofffilzmaterialien, die am ICB Zaragoza synthetisiert wurden, in einer Flow-Batterie zu messen, die gut verfügbare organische Moleküle und kostengünstige Eisensalze verwendet. Zu den spezifischen Aktivitäten gehörten die elektrochemische Analyse von Anthrachinonmolekülen an modifizierten Kohlenstofffilzen und die Untersuchung der Leistung von halborganischen Flow-Batterien mit verschiedenen Elektrodenmaterialien. Die Aktivitäten wurden von Dr. Luis Fernando Arenas, einem auf dem Gebiet der Flow-Batterien erfahrenen Humboldt-Forschungsstipendiaten, geleitet. Am ICB Zaragoza wird Herr Molina von Dr. María Jesús Lázaro, Dr. Cinthia Alegre und Dr. Francisco Carrasco betreut. Ihre Forschungsgruppe konzentriert sich auf die Entwicklung fortschrittlicher Elektrodenmaterialien für verschiedene Batterietypen. Der Besuch wurde von Prof. Thomas Turek, dem Direktor des ICVT, ermöglicht.

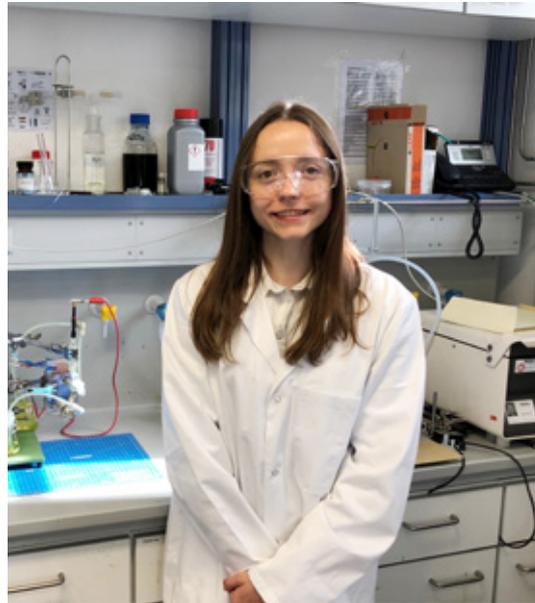


Nanostructured electrodes for high-performance organic flow batteries.

The Institute of Chemical and Electrochemical Process Engineering (ICVT) and the Research Center for Energy Storage Technologies (EST) have initiated a collaboration with the Institute of Carbon Materials (ICB) from the Spanish National Research Council (CSIC), Zaragoza, Spain. The aim of the joint work is to evaluate novel nanostructured materials as carbon-based electrodes for the improvement of flow batteries. This technology is expected to play an important role in the storage of renewable energy. To achieve this, PhD candidate Mr. Antonio Jesús Molina Serrano visited Energy Campus Goslar for three months, measuring the energy efficiency of carbon felt materials synthesized at ICB Zaragoza in a flow battery that uses abundant organic molecules and low-cost iron salts. Some specific activities included the electrochemical analysis of anthraquinone molecules at modified carbon felts and the study of the performance of semi-organic flow batteries with different electrode materials. The activities were guided by Dr. Luis Fernando Arenas, a Humboldt Research Fellow experienced in flow batteries. At ICB Zaragoza, Mr. Molina is supervised by Dr. María Jesús Lázaro, Dr. Cinthia Alegre and Dr. Francisco Carrasco. Their research group focuses on developing advanced electrode materials for several types of batteries. The visit was facilitated by Prof. Thomas Turek, director of ICVT.

Charakterisierung von innovativen elektrochemischen Mikroreaktoren für die Wasseraufbereitung.

Das Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT) und das Forschungszentrum für Energiespeichertechnologien (EST) haben Frau Inmaculada García López für einen Praktikumsaufenthalt am Energie Campus Goslar empfangen. Frau García López ist Doktorandin an der Universidad Complutense de Madrid, Spanien, unter der Leitung von Prof. Amalio Garrido Escudero und Prof. Vicente Ismael Águeda Maté. Derzeit entwickelt sie fraktale und organisch geformte Strömungskanäle für elektrochemische Mikroreaktoren zur Wasseraufbereitung. Während ihres Aufenthalts überprüfte Frau García López die Leistungsfähigkeit ihrer Versuchsanordnung und stellte die Eignung von Elektrodenmaterialien fest. Ferner erwarb sie Kenntnisse über neue elektrochemische Techniken. Die Erkenntnisse ermöglichen die Charakterisierung des Stofftransports in neuen Zellkonzepten und Validierung der laufenden numerischen Multiphysik-Simulationen. Das Ziel ihrer Arbeit ist die Optimierung der Leistung innovativer Mikroreaktoren, die mittels additiver Fertigung für die tragbare und dezentrale Wasserdesinfektion hergestellt werden. Dr. Luis Fernando Arenas, ein erfahrener Experte auf dem Gebiet des elektrochemischen Zeldesigns, leistete technische Unterstützung. Der Besuch wurde von Institutsleiter Prof. Thomas Turek gesponsert.



Characterization of innovative electrochemical microreactors for water treatment.

The Institute of Chemical and Electrochemical Process Engineering (ICVT) and the Research Center for Energy Storage Technologies (EST) hosted Ms. Inmaculada García López for a training stay at Energy Campus Goslar. Ms. García López is a PhD candidate at Universidad Complutense de Madrid, Spain, under the supervision of Prof. Amalio Garrido Escudero and Prof. Vicente Ismael Águeda Maté. She currently develops fractal and organic-like flow channels for electrochemical microreactors for water treatment applications. During her stay, Ms. García López verified the performance of her experimental arrangement, established the suitability of electrode materials and acquired knowledge in new electrochemical techniques. This will enable the characterization of mass transport in new cell designs and the validation of ongoing numerical “multiphysics” simulations. The final aim of her work is to optimize the performance of innovative microreactors produced via additive manufacturing for portable and remote water disinfection. Dr. Luis Fernando Arenas, who is experienced in electrochemical cell design, provided technical guidance. The visit was sponsored by institute director Prof. Thomas Turek.





STRATEGIEBILDENDE FORSCHUNGSPROJEKTE IN DEN JAHREN 2022/2023

3.

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



Abbildung 1: Projekt-Logo.

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, dass die aktuellen Testvorschriften einen Parameterspielraum für die Testdurchführung möglich machen, 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 werden und die Charakteristik der Fehlerfälle mit umfangreicher Messtechnik aufgezeichnet und analysiert werden. Durch die Nutzung von den 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 konstruktiven Maßnahmen für neue, sicherere Batterieanwendungen und 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 mechanische Beschädigung oder dem Betrieb außerhalb der Betriebsgrenzen, kommt es in der Praxis immer wieder zu sicherheitskritischen Zuständen und der 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 Maß-

nahmen, frühzeitigen Detektionsmöglichkeiten und geeigneter Schutzausrüstung für Rettungskräfte müssen möglichst viele Informationen zur Entstehung, der Entwicklung und der Ausprägung von sicherheitskritischen Zuständen von 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 sollten im Projekt RiskBatt insgesamt über 200 Abuse-Tests durchgeführt werden. Ein Teil dieser Zellen wurde 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-Ereignisses 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 (Fourier-Transform-Infrarotspektrometer) und FID (Flammenionisationsdetektor) werden vom Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum CUTEC betreut. Auf Basis der detektierten Gase wird vom CUTEC eine Bewertung der chemischen Risiken durchgeführt. Das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut HHI stattet einige Zellen zur Dehnungsmessung mit faseroptischer Sensorik aus und nutzt die in der Datenbank hinterlegten Abuse-Ergebnisse zum Aufbau eines Systems zur Havarievorhersage.

Projektstand

Nach einer Verlängerung um sechs Monate endete das Projekt am 30.09.2023. Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wurden im Rahmen des Projektes insgesamt über 250 Abuse-Tests durchgeführt. Während der Versuchsdurchführung wurde umfangreiche Messtechnik zur Abuse-Charakterisierung eingesetzt und die Eignung dieser Messtechnik bewertet. Die Bewertung dieser Messtechnik ist in Tabelle 1 dargestellt.

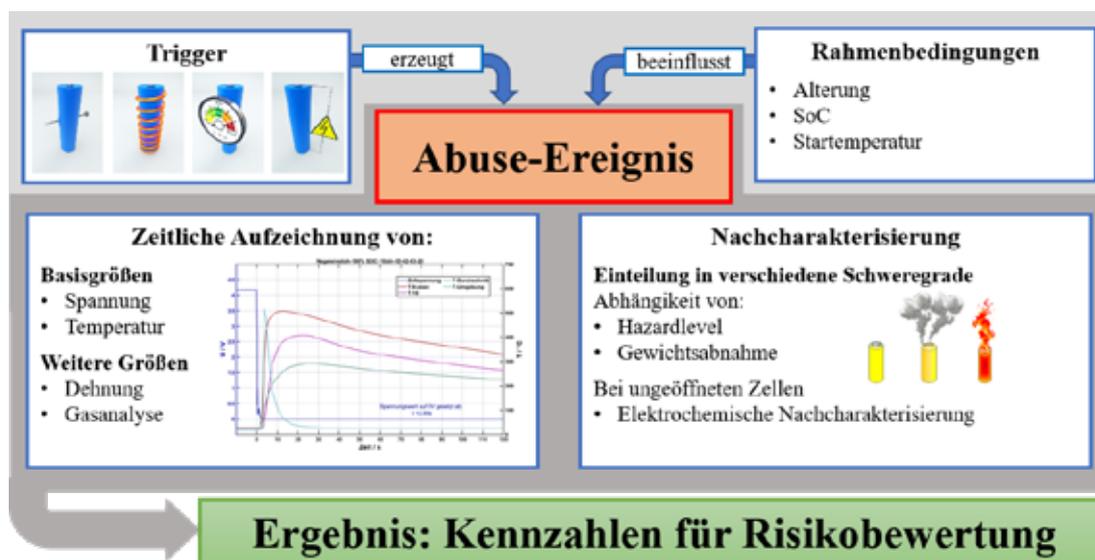


Abbildung 2: Schema zur Definition verschiedener Kennzahlen aus dem Abuse-Ereignis als Grundlage für die Risikobewertung.

Messverfahren	Erkenntnisse	Bewertung
Temperatur (Typ K)	<ul style="list-style-type: none"> • therm. Stabilität • Temperaturverteilung • max. Temperatur 	++
Temperatur (Wärmebildkamera)	<ul style="list-style-type: none"> • evtl. Temperaturverteilung • Flammentemperatur 	0
Spannung/Strom	<ul style="list-style-type: none"> • ISC Charakteristik • Selbstentladung 	++
Video	<ul style="list-style-type: none"> • Aufblähen • Zeitpunkt Öffnung Berstventil • Flamme (Ja/Nein) • Zündzeitpunkt • Rauchcharakteristik 	0
Innendruck (Drucksensor)	<ul style="list-style-type: none"> • Zersetzungscharakteristik • Zeitpunkt Öffnung Berstventil 	+
Gewicht	<ul style="list-style-type: none"> • Massenverlust 	0
B-Feld	<ul style="list-style-type: none"> • nicht umsetzbar 	-

Tabelle 1: Bewertung verschiedener Messverfahren zur Abuse-Charakterisierung von Lithium-Ionen-Batterien.

Wie in Tabelle 1 dargestellt, wurde bei einigen Abuse-Tests der Innendruck der Zelle durch einen Drucksensor gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Messung des Innendrucks besonders gut für die Charakterisierung nach dem Abuse eignet. So konnte bei unzulässiger thermischer Belastung der Zelle ein Zusammenhang zwischen Kapazitätsabnahme, Widerstandszunahme und irreversiblen Druckanstieg nachgewiesen werden. Diese Zusammenhänge sind in Abbildung 3 dargestellt. Im Fall von Beschädigungen ohne Schmelzen und Porenschließung des Separators wird eine Korrelation zwischen irreversiblen Druckanstieg, Kapazitätsabnahme und Innenwiderstandszunahme erwartet. Korrelieren diese Größen nicht, dann ist die Beschädigung augenscheinlich so weit vorangeschritten, dass es zum Schmelzen des Separators gekommen ist.

Dieser Aufbau ermöglichte die Entwicklung einer neuen Methode zur Bewertung der thermischen Schädigung von äußerlich unbeschädigten und elektrochemisch intakten Zellen. Thermisch geschädigte Zellen wurden auf ihre thermische Stabilität und Zyklenstabilität untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zyklierung der thermisch geschädigten Zellen mit lokalem Porenverschluss des Separators zu einem spontanen Thermal Runaway führen kann. Darüber hinaus konnte mittels Innendruckmessung gezeigt werden, dass die Reaktionsgeschwindigkeit der ersten exothermen Zersetzungsreaktionen nicht direkt vom Ladezustand der Zelle, sondern von der Zellspannung beeinflusst wird. Diese Erkenntnis bildet die Grundlage für die Definition von Worst-Case-Szenarien für die Sicherheitstests nach den Normen.

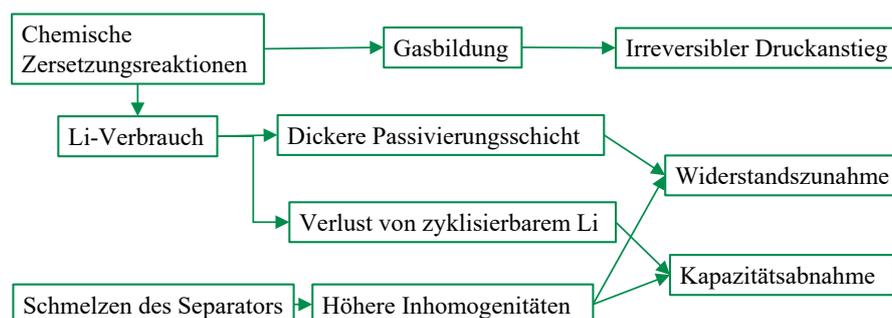


Abbildung 3: Links schematische Darstellung der Zusammenhänge zwischen den Zersetzungsprozessen und deren messbaren Folgen. Rechts ist der Aufbau zur Messung des Zellinnendrucks dargestellt.

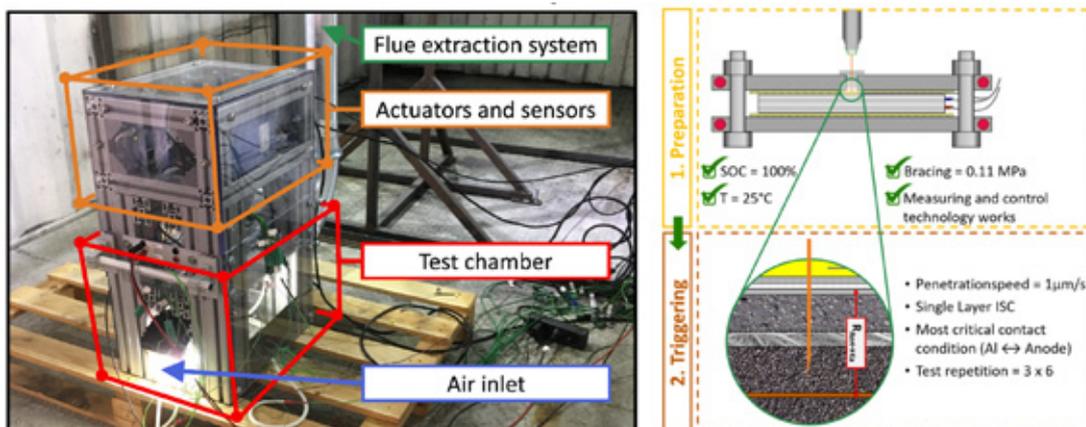


Abbildung 4: Links der entwickelte Prüfstand und rechts die Methodik der Triggerung von einlagigen internen Kurzschlüssen.

Im Rahmen des Projektes wurden umfangreiche Untersuchungen zu den in den Normen definierten Auslösemechanismen (Trigger) und zu neuen Verfahren durchgeführt. Als Ergebnis zeigte sich, dass die herkömmliche, in den Normen definierte Nagelpenetration für die geringe Reproduzierbarkeit bekannt ist und praxisnahe Fehlerfälle nur in geringem Maße nachbildet [4]. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes ein neuartiges Verfahren zur Erzeugung praxisrelevanter innerer Kurzschlüsse entwickelt. Mit Hilfe des aufgebauten Prüfstandes wurden einlagige interne Kurzschlüsse, die typischerweise durch zellinterne Verunreinigungen verursacht werden, erzeugt und charakterisiert. Der Prüfstand ist in Abbildung 4 links und die Methodik der Triggerung von einlagigen internen Kurzschlüssen in Abbildung 4 rechts dargestellt. Ein umfassender Ansatz zur Charakterisierung wurde durch detaillierte Messungen der

dynamischen Kurzschlussentwicklung und eine anschließende Nachcharakterisierung verfolgt. Die Nachcharakterisierung umfasst die Anwendung verschiedener elektrochemischer Messverfahren sowie eine Post-Abuse-Analyse. Die Ergebnisse zeigen, dass die Zellen ein sehr individuelles und schwer vorhersagbares Verhalten zeigen, was eine große Herausforderung für die Früherkennung von Fehlern und die Risikobewertung von Zellen mit einem bestehenden oder aufgelösten internen Kurzschluss darstellt. Einerseits wurde festgestellt, dass die Zelle trotz hoher lokaler Temperaturen von über 1.260 °C und erheblicher Schädigung der zellinternen Struktur auch nach weiteren Zyklen keinen TR entwickelte. Andererseits wurde beobachtet, dass der TR spontan auftreten kann, ohne dass zuvor irgendwelche Anomalien aufgetreten waren.

Veröffentlichungen

Die wesentlichen Ergebnisse des Projektes wurden in folgenden Veröffentlichungen dargestellt:

Paper: Comparison of Model-Based and Sensor-Based Detection of Thermal Runaway in Li-Ion Battery Modules for Automotive Application [5].

Paper : Particle Contamination in Commercial Lithium-Ion Cells-Risk Assessment with Focus on Internal Short Circuits and Replication by Currently Discussed Trigger Methods [6].

Paper: Triggering and Characterisation of Realistic Internal Short Circuits in Lithium-Ion Pouch Cells-A New Approach Using Precise Needle Penetration [7].

Poster: Impurity particle contamination in lithium-ion batteries -a risk for safety-critical internal short circuits (ISC) [8].

Poster: Improving the safety of lithium-ion cells through pressure-controlled removal of gaseous electrolyte [9].

Poster: Influence of compression condition on the behaviour of lithium-ion cells in the event of an external short-circuit [10].

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

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

Förderung durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Förderkennzeichen:

03EI3010A

Laufzeit:

01.04.2020 – 30.09.2023

Projektbeteiligte:

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

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengler



Dr.-Ing. Ralf Bengler

Projektbearbeiter:

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



Nury Orazov



Jens Grabow

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*, Jg. 81, S. 1427–1452, 2018, DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.195.
- [2] J. Tübke et al.: "12 Li-Secondary Battery: Damage control", in *Li-battery safety (Electrochemical power sources)*, J. Garche und K. Brandt, Hg., San Diego: Elsevier, 2019, S. 507–629.
- [3] F. Diaz, Y. Wang, R. Weyhe und B. Friedrich: "Gas generation measurement and evaluation during mechanical processing and thermal treatment of spent Li-ion batteries", *Waste management (New York, N.Y.)*, Jg. 84, S. 102–111, 2019, DOI: 10.1016/j.wasman.2018.11.029.
- [4] V. Ruiz und A. Pfrang: "JRC exploratory research: Safer Li-ion batteries by preventing thermal propagation", Petten, Netherlands, Mrz. 2018.
- [5] J. Klink et al.: "Comparison of Model-Based and Sensor-Based Detection of Thermal Runaway in Li-Ion Battery Modules for Automotive Application", *Batteries*, Jg. 8, Nr. 4, S. 34, 2022, DOI: 10.3390/batteries8040034.
- [6] J. Grabow, J. Klink, R. Benger, I. Hauer und H.-P. Beck: "Particle Contamination in Commercial Lithium-Ion Cells—Risk Assessment with Focus on Internal Short Circuits and Replication by Currently Discussed Trigger Methods", *Batteries*, Jg. 9, Nr. 1, S. 9, 2023, DOI: 10.3390/batteries9010009.
- [7] J. Grabow, J. Klink, N. Orazov, R. Benger, I. Hauer und H.-P. Beck: "Triggering and Characterisation of Realistic Internal Short Circuits in Lithium-Ion Pouch Cells—A New Approach Using Precise Needle Penetration", *Batteries*, Jg. 9, Nr. 10, S. 496, 2023, DOI: 10.3390/batteries9100496.
- [8] Jens Grabow, Ralf Benger, Ines Hauer und Hans-Peter Beck: "Impurity particle contamination in lithium-ion batteries -a risk for safety-critical internal short circuits (ISC)", 2023, DOI: 10.13140/RG.2.2.13997.56808.
- [9] Nury Orazov, Ralf Benger, Heinz Wenzl und Ingo Koch: "Improving the safety of lithium-ion cells through pressure-controlled removal of gaseous electrolyte during abuse", 2023, DOI: 10.13140/RG.2.2.27299.63521.
- [10] Jens Grabow, Nury Orazov, Ralf Benger, Ines Hauer und Hans-Peter Beck: "Influence of compression condition on the behaviour of lithium-ion cells in the event of an external short-circuit", 2023, DOI: 10.13140/RG.2.2.15101.33769.

GridBatt: Batterietechnologien zur Sicherstellung eines sicheren Netzbetriebs

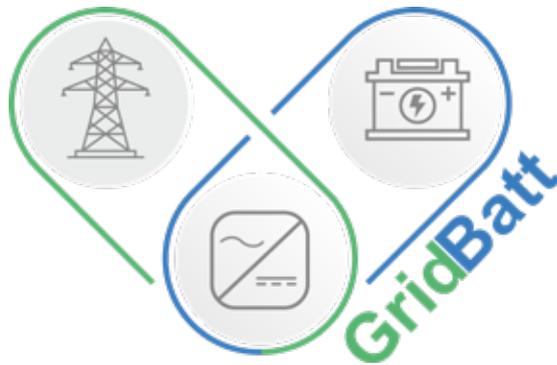


Abbildung 1: Projekt-Logo.

Kurzfassung

Ziel des Projekts GridBatt ist es, die besonderen Anforderungen bei der Verwendung eines Batteriespeichers zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebes 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, die Systemanforderungen und die 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

Projektpartner

- Technologiezentrum für Hochleistungsmaterialien (THM) Freiberg /Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologien (IISB)
- Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg mit den dortigen Lehrstühlen für Leistungselektronik und Elektrische Netze und Erneuerbare Energie vom Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)

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.

Motivation

Auf Grund 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 Investitionskosten 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 mit Hilfe 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, die Systemanforderungen und die jeweiligen Rückkopplungen ermöglicht es, das volle Potential von Batterien auszuschöpfen.

Dabei ist maßgeblich zu berücksichtigen, dass die elektrischen Belastungen in vielen Systemen 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 ökonomischen 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- (μ s 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, so dass sie bereits heute oftmals in Konkurrenz treten können. Es gibt jedoch immer noch Anwendungen, in denen Kondensatoren, DSK, SMS eine zu geringe Energiedichte (spezifisch bezogen auf Masse oder Kosten) aufweisen, Batterien auf Grund 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 ausgelegt ist. Hierfür fehlt der „ideale“ Speicher.

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 existiert kein Optimum und keine anwendungsfallsspezifische 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 skalenübergreifende 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 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.

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. Ein wesentlicher Bestandteil des Teilprojekts des EST ist neben der Erstellung des Gesamtmodells Netz-Batterie-Umrichter die dynamische Batteriemodellierung und Charakterisierung.

	Name	Kapazität / Ah	Nenn-energie / Wh	Typ	Bauform
Kommerziell	SLPB11543140H5	5	18,50	NMC, HP	Pouch
	SLPB98106100	10	37,00	NMC, HE	Pouch
	PHEV2_37Ah	37	136,90	NMC, HE	PHEV2
	HTC1865	1,3	3,12	LTO	18650
	SCiB2.9Ah	2,9	6,96	LTO	Prismatisch
	HAA_AA_10000F	4,16 /10kF	19,20 (4V-1,5V)	Li-C	Pouch
	SCE0400SPSCAP	0,3	0,405	Ultra-Cap	35630 (Rundzelle)
Laborzelle	PAT_NMC111	0,0025	0,009	NMC 111, HP	PAT-Cell
	PAT_NMC811	0,0022	0,008	NMC 811, HP	PAT-Cell
	PAT_LTO	0,0024	0,005	LTO	PAT-Cell
	PAT_AIB	0,001	0,001	Al/C	PAT-Cell
	Pouch_AIB	0,025	0,05	Al/C	Pouch

Tabelle 1: Übersicht der im Rahmen des Projekts charakterisierten Energiespeicher.

Die Möglichkeiten der Bewertung von Energiespeichern für innovative neuartige Anwendungen wie die dynamisch Netzstabilisierung sind derzeit aufgrund des allgemeinen Fokus auf automobile Anwendungen eingeschränkt. So sind bei gängigen Charakterisierungstest wie dem HPPC [1] oder den Datenblattangaben kommerzieller Zellen stets die automotive-typischen Anforderungen zu finden. Im Besonderen die im Netzbetrieb zu erwartenden kurzzeitigen, symmetrischen Belastungen mit großen P/E-Verhältnissen sind unüblich.

Um dennoch eine vergleichende Bewertung der verschiedenen Energiespeichertechnologien vornehmen zu können, ist der HPPC-Test für symmetrische Belastung modifiziert worden. Darüber hinaus wurde in Ergänzung zu den Stromsprungvorgaben des HPPC eine Messmethode auf Basis von Spannungssprüngen (s. Chronoamperometrie [2]) erarbeitet, welche die Maximalbelastung unter Berücksichtigung der Spannungsgrenzen ermöglicht. Neben der Analyse der zeitlichen Leistungs- und Energiepotentiale ermöglicht der HPPC-Test auch die Extraktion von Modellparametern für die Nachbildung des dynamischen Speicherhaltens, wie sie im Rahmen der Simulation des Gesamtsystems vorgesehen ist. Zur Ergänzung dieser Parameter wurden zudem eine Vermessung mittels Impedanzspektroskopie vorgenommen sowie der ladezustandsabhängige Verlauf des Leerlaufpotentials ermittelt.

Zusätzlich zu den im Projekt durchs IISB entwickelten AIB-Zellen wurde eine Variation von exemplarischen Vertretern diverser Speichertechnologien ausgewählt und untersucht, wie in Tabelle 1 aufgelistet.

Mit den gelisteten Speichern ist eine große Bandbreite der zu charakterisierenden Größenordnungen verbunden, wofür am EST auf eine breit aufgestellte Infrastruktur zurückgegriffen werden konnte. Eine der Herausforderungen des Projekts war daher, die Übertragbarkeit von Testvorschriften und Ergebnissen zwischen den einzelnen Testsystemen verschiedener Leistungsklassen und Herstellern zu ermöglichen.

Als Ergebnis wurde ein Datenaustauschformat entwickelt, welches von einfachen Datenblattangaben und Informationen über Charakterisierungsergebnissen bis hin zu Parameterfeldern die Ergebnisse der Charakterisierung beinhaltet. Durch diesen Ansatz wird eine einheitliche Datenstruktur gewährleistet, was den Vergleich der verschiedenen Energiespeicher ebenso erleichtert wie den Zugriff auf Parameter im Rahmen der oben genannten Simulation oder zum Zwecke der Datennachnutzung nach Projektende.

In Abbildung 2 sind die ermittelten Leerlaufspannungskennlinien (P-OCV) dargestellt, anhand welcher sich die verschiedenen Speicherchemien gut identifizieren lassen. Wie zu erwarten, sind

$$I_{max} = \frac{|U_{max} - U|}{R} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$I_{max,limit} = \min(I_{limit}; I_{max}) \quad \text{Eq. (2)}$$

innerhalb eines Types nur geringe Abweichungen trotz signifikanter Bauform und Kapazitätsunterschiede zu beobachten. Ausgehend von der OCV sowie dem Innenwiderstand wird in der Literatur zur Abschätzung des Strompotentials die Differenz zur zulässigen Spannungsgrenze verwendet, wie in Eq. (1) am Beispiel der oberen Spannungsgrenze exemplarisch dargestellt. Der so ermittelte Wert lässt sich durch die Randbedingung der zulässigen Stromgrenzen (s. Eq. (2)) noch weiter einschränken. Diese Methode stößt jedoch bei veränderlichem, nicht-linearem Verhalten des Widerstands ($f(\text{SOC}, I, \dots)$) sowie fehlenden Datenblattangaben bei Prototypen auf Grenzen. Die entwickelte CV-Charakterisierung benötigt hingegen ausschließlich die durch die Elektrochemie vorgegebenen Spannungsgrenzen, sodass eine Vermessung auch bei unbekanntem Zellverhalten möglich ist.

Das Ergebnis einer solchen Charakterisierung ist exemplarisch für drei der untersuchten Speicher in Abbildung 3 dargestellt. Aufgrund der signifikanten Bandbreite von $<1 \text{ mA}$ bis hin zu $>>100 \text{ A}$

ist eine Darstellung relativ zum Energieinhalt gewählt worden. Neben der Peakleistung direkt zum Anfang der Pulsvorgabe lässt sich mit der Methode auch die Leistung nach einer Zeit x auswerten und so die dynamische Leistungsbereitschaft evaluieren, wie in Abbildung 3 beispielhaft für den 10s Wert zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Speichern, sowohl in dem allgemeinen P/E Verhältnis als auch in der zeitlichen Dynamik, welche bei der Systemauslegung zu berücksichtigen sind. So zeigt die AIB im Besonderen bei niedrigen und mittleren Ladezuständen der Peakleistung deutlich bessere Performance als die anderen Speicher, verliert diesen Vorteil jedoch bei einer längeren Belastungsdauer.

Einen Vergleich der zahlreichen im Projekt betrachteten Speicher anzustellen, stellt sich aufgrund der Vielzahl an Parametern wie des Ladezustands, der Belastungsdauer, des Bezugs für die Normierung etc. schnell als unübersichtlich heraus. Diese Herausforderung konnte durch die Entwicklung einer interaktiven Weboberfläche zur Adressierung der im Projekt erfassten Messdaten gelöst werden. In Abbildung 4 ist ein Screenshot der Anwendung dargestellt – der Anwender hat die Möglichkeit, durch entsprechende Auswahl von Parametern den gewünschten Vergleich zu verfeinern.

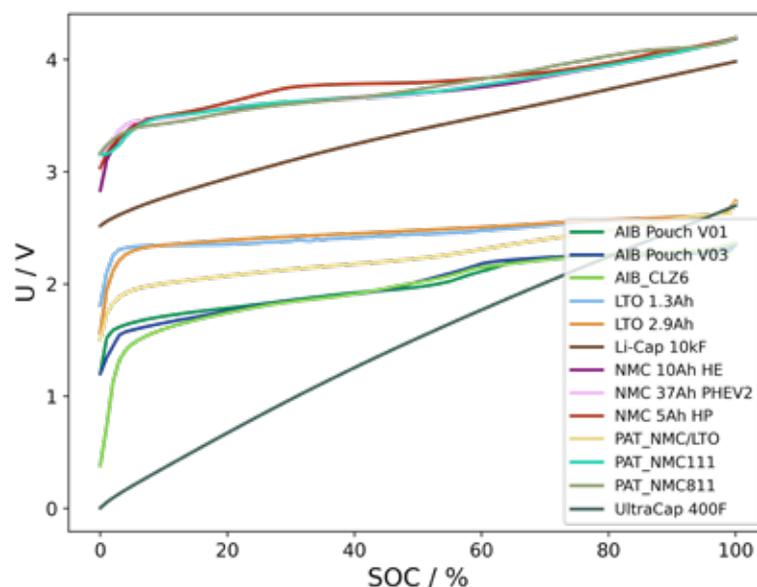


Abbildung 2: Messtechnisch ermittelte Pseudo-OCV-Charakteristik für die untersuchten Energiespeicher. Die dargestellten Daten sind aus der entwickelten strukturierten Datenablage extrahiert.

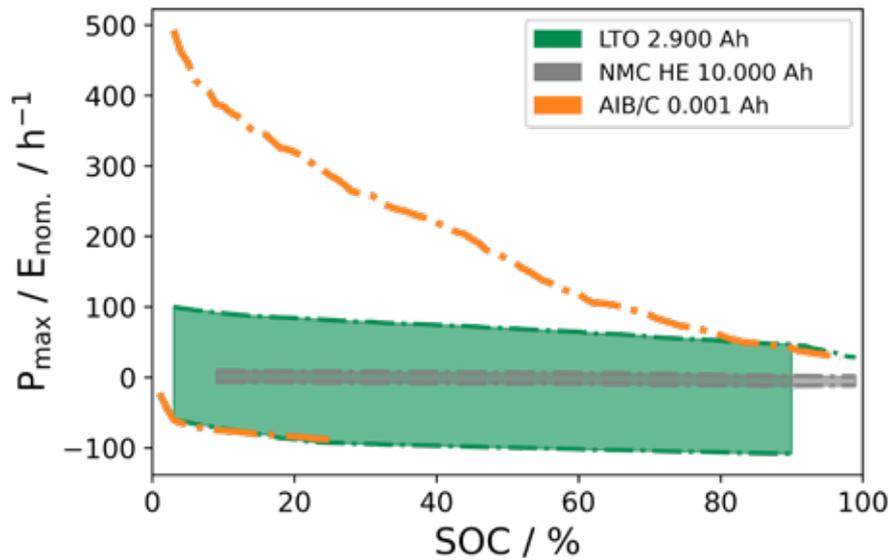


Abbildung 3: Durch CV-Charakterisierung ermitteltes relatives Leistungspotential. Maximale Peakleistung (gestrichelt) und Leistungsniveau nach 10s (gepunktet) für 3 verschiedene Zellchemien in Abhängigkeit des Ladezustands.



Abbildung 4: Screenshot der Weboberfläche für den Zugriff auf die Messdaten. Interaktive Anpassung der dargestellten Auswertungen möglich.

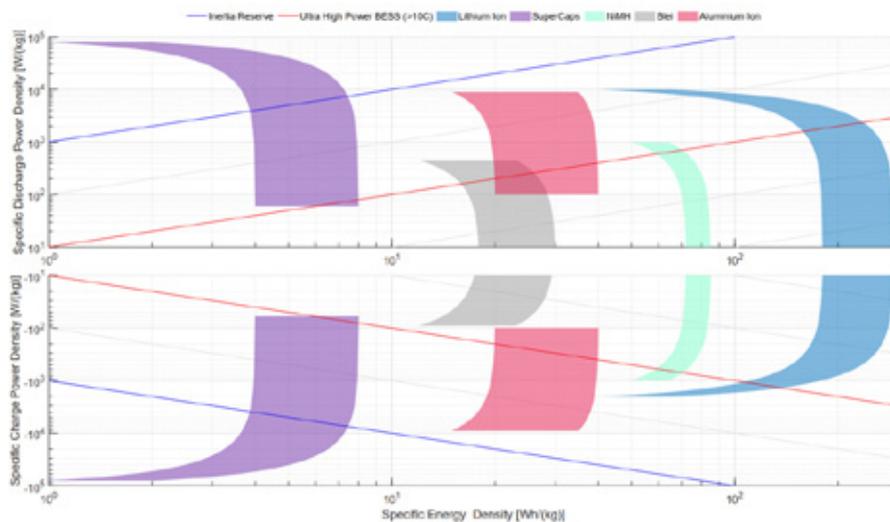


Abbildung 5: Erweitertes Ragone-Diagramm zur Einordnung relevanter elektrochemischer Speichertechnologien bzgl. spezifischer Leistung- und Energiedichte. Im Gegensatz zu üblichen Darstellungen ist im unteren Diagramm die Laderichtung abgebildet, da diese typischerweise für viele Technologie begrenzt wird. Für AIB (rote Fläche) sind diese Beschränkungen in Laderichtung nicht gegeben. Für pulsartige Belastungen wird erwartet, dass die Anforderungen zur Erbringung von Momentanreserve (blaue Gerade) erfüllt werden können.

Vergleich von Speichertechnologien

In Zusammenarbeit mit dem IISB ist vom EST ein erweitertes Ragone-Diagramm entwickelt worden, siehe Abbildung 3, 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 System-sicherheit", 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, Benger, Beck, Schael, Kruschel, Ulbrich, 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., Benger, R., Gollenstede, J., Werther, B., Beck, H.-P.: 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, Benger, Kruschel, Reineke, Schael, Turschner, 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] Benger, 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.

References

- [1] J. P. Christophersen: "Battery Test Manual For Electric Vehicles," Idaho Falls, Idaho, Jun. 2015. Accessed: Jan. 4 2020. [Online]. Available: <https://inldigitalibrary.inl.gov/sites/STI/STI/6492291.pdf>
- [2] C. Heubner, C. Lämmel, A. Nickol, T. Liebmann, M. Schneider, and A. Michaelis: "Comparison of chronoamperometric response and rate-performance of porous insertion electrodes: Towards an accelerated rate capability test," Journal of Power Sources, vol. 397, pp. 11–15, 2018, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.087.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

GridBatt: Batterietechnologien zur Sicherstellung eines sicheren Netzbetriebs

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen:

03XP0307

Projektlaufzeit:

01.10.2020–31.03.2024

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

VentBatt: Erhöhung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien durch ein innovatives, ventilgesteuertes Gas- und Thermomanagement

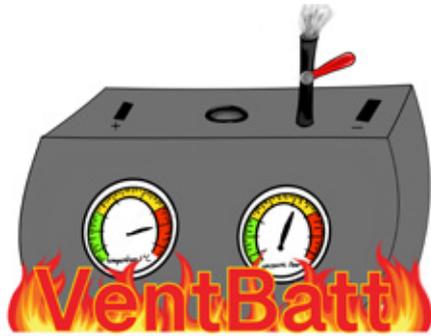


Abbildung 1: Projekt-Logo.

Kurzfassung

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) können bei missbräuchlicher Behandlung oder Produktionsfehlern erhebliche Energiemengen freisetzen. Dieses führt zur Entwicklung hohen Drucks und sehr hohen Temperaturen sowie der Freisetzung toxischer, explosionsfähiger und brennbarer Gase, den sogenannten Thermal Runaway (TR). Durch sehr heiße Partikel, die mit dem Gasstrom aus dem Zellinneren nach außen geführt werden oder bei Überschreiten bestimmter Temperatur- und Konzentrationsgrenzen kann dann eine (Selbst-)Entzündung der Gase an der Luft und/oder sogar eine Explosion erfolgen. Die Auswirkungen eines TR auf die unmittelbare Umgebung, insbesondere bei Übergreifen auf weitere Zellen, als thermische Propagation bezeichnet, sind erheblich.

Ziel des Projekts VentBatt ist daher die Minimierung bzw. Vermeidung von Risiken in Zusammenhang mit dem Betrieb von LIB durch Reduzierung der Temperatur und Konzentration der ausströmenden Gase unter die sicherheitskritischen Schwellenwerte sowie die Vermeidung einer Thermischen Propagation durch Verminderung der Wärmeerzeugungsrate der Zelle,

Projektpartner:

- BorgWarner Akasol GmbH, Darmstadt
- UniverCell Holding GmbH, Flintbek
- Teubert Maschinenbau GmbH, Blumberg
- Frötek Kunststofftechnik GmbH, Osterode

die einen TR erleidet. Das Projektziel entspricht somit der Umsetzung der klassischen Prinzipien der Brandvermeidung: Unterschreitung der Zündtemperatur sowie Vermeidung einer brennbaren Gas- und Sauerstoffmischung. Dazu werden im Rahmen des Vorhabens Maßnahmen entwickelt und untersucht, die durch ein kontrolliertes Gas- und Thermomanagement eine Erhöhung der Sicherheit von LIB ermöglichen.

Summary

Lithium-ion batteries (LIB) can release considerable amounts of energy in the event of misuse or production faults. This leads to the evolution of high pressure and very high temperatures as well as the release of toxic, explosive and flammable gases, the so-called Thermal Runaway (TR). Very hot particles carried with the gas flow from inside the cell to the outside, or when certain temperature and concentration limits are exceeded, can then cause (self-)ignition of the gases in the air and/or even an explosion. The effects of a TR on the immediate environment, especially if it spreads to other cells, known as thermal propagation, are considerable.

The aim of the VentBatt project is therefore to minimise or avoid risks associated with the operation of LIBs by reducing the temperature and concentration of the escaping gases below the safety-critical thresholds, and to avoid thermal propagation by reducing the heat generation rate of the cell suffering a TR. The project objective thus corresponds to the implementation of the classical principles of fire prevention: falling below the ignition temperature and avoiding a combustible gas and oxygen mixture. To this end, measures are being developed and investigated in the project that enable an increase in the safety of LIBs through controlled gas and thermal management.

Motivation

Als Energiespeicher sind Lithium-Ionen-Batterien (LIB) derzeit für viele Anwendungen konkurrenzlos und finden sich daher in nahezu

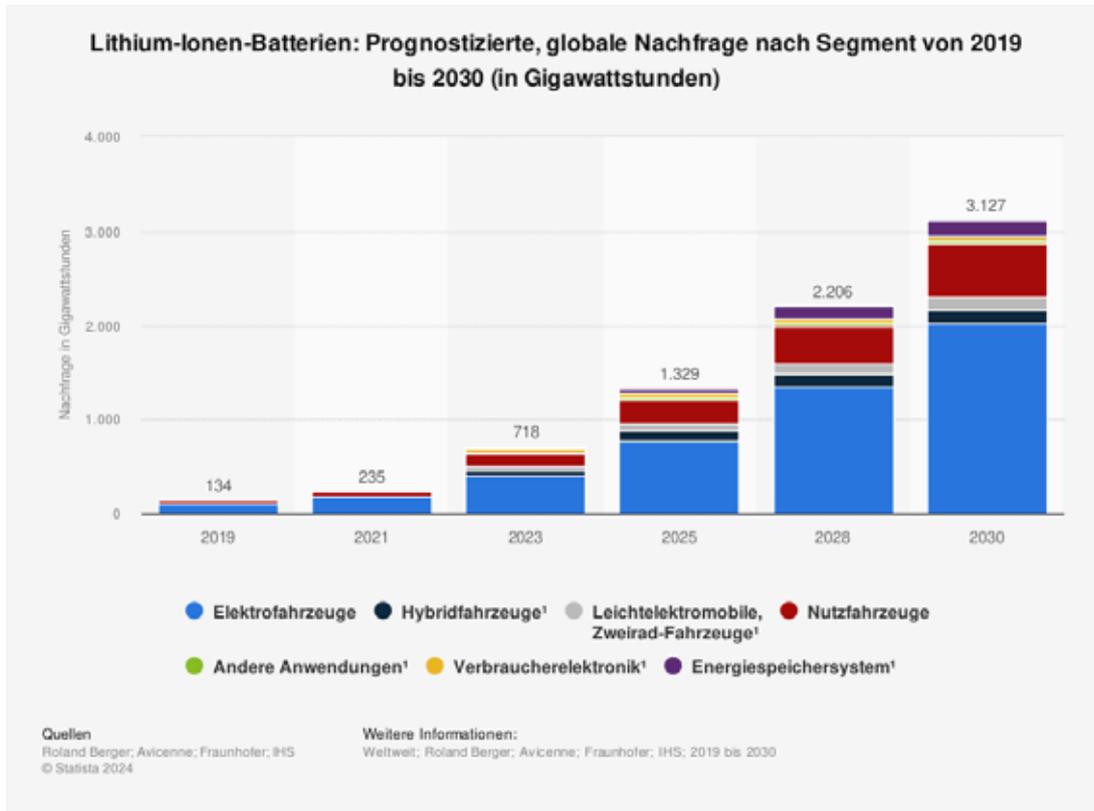


Abbildung 2

allen Lebensbereichen in großer Anzahl wieder. Insbesondere für tragbare Geräte und Elektrofahrzeuge werden die Entwicklungen hin zu immer leistungsfähigeren Zellen und Batteriesystemen mit hoher Energiedichte vorangetrieben. Damit steigt auch die potentielle Gefährdung durch diese Batteriesysteme. Da sich bis zum Jahr 2030 die Nachfrage nach LIB mehr als vervierfachen wird [Statista], ist alleine auf Grund der sehr hohen Anzahl von Zellen mit einer steigenden Anzahl von Vorfällen zu rechnen.

Lithium-Ionen-Zellen setzen bei missbräuchlicher Behandlung oder Produktionsfehlern

erhebliche Energiemengen frei, was zur Entwicklung hohen Drucks und sehr hoher Temperatur und der Freisetzung toxischer, explosionsfähiger und brennbarer Gase führt, üblicherweise als Thermal Runaway (TR) bezeichnet [1]. Durch sehr heiße Partikel, die mit dem Gasstrom aus dem Zellinneren nach außen geführt werden, oder bei Überschreiten bestimmter Temperatur- und Konzentrationsgrenzen der ausströmenden Gase kann eine Entzündung oder Selbstentzündung der Gase an Luft und/oder eine spontane Explosion erfolgen [2]. Die Auswirkungen eines TR auf die unmittelbare Umgebung, insbesondere bei Übergreifen auf weitere Zellen, als thermische Propagation (TP) bezeichnet, sind erheblich.



Abbildung 3: Verbrennungsdreieck - notwendige Bedingungen für die Entstehung von Feuer.

Ziel des Projekts ist die Minimierung bzw. Vermeidung von Risiken in Zusammenhang mit dem Betrieb von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) durch Reduzierung der Temperatur und Konzentration der ausströmenden Gase unter die Grenzwerte, bei denen eine Selbstentzündung oder eine spontane Gasexplosion erfolgen kann, sowie Vermeidung einer Thermischen Propagation durch Verminderung der Wärmeerzeugungsrate der Zelle, die einen TR erleidet. Das Ziel entspricht somit der Umsetzung der klassischen Prinzipien der Brandvermeidung: Unterschreitung der Zündtemperatur sowie Vermeidung einer brennbaren Gas- und Sauerstoffmischung.

Dazu werden im Rahmen des Vorhabens Maßnahmen entwickelt und untersucht, die durch ein kontrolliertes Gas- und Thermomanagement eine Erhöhung der Sicherheit von LIB ermöglichen.

Bezogen auf die EUCAR-Sicherheitslevels [3] ist das Ziel die Verhinderung der Gefährdungsstufen 5 – 7, d.h., dass zwar Gasaustritt möglich ist, aber keine Flambildung oder Explosion erfolgen kann.

Ansatz

Es werden drei (komplementäre) Konzepte betrachtet, um den Thermal Runaway einer Lithium-Ionen-Zelle zu verhindern oder mindestens deutlich zu verzögern:

- gezielte Druckentlastung über Ventile
- Nutzung von Partikelschäumen zur Minderung der Temperatur und Erniedrigung der Konzentration der brennbaren Gase auf ein Maß unterhalb der Brand- und Explosionsgrenzen bis zur Mischung mit der Umgebungsluft
- Vorgehensweise für das optimierte Design eines Batteriesystems einschließlich Gehäuse und Strömungsführung für die ausströmenden Gase unter der Beachtung von Propagationsbarrieren durch Isolationsmaterial, verbesserter Wärmeleitung und/oder forcierter Kühlung

Da die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Druck in der Zelle (sofern eine Bestimmung ex situ überhaupt möglich ist), in Abhängigkeit vom Lade- und Gesundheitszustand sowie äußeren Bedingungen und Betriebszustand äußerst komplex sind, sind im Rahmen des Projekts Parameterfelder zu untersuchen, bei denen eine gezielte Beeinflussung von Druck und/oder Temperatur eine Havarie verhindern können. Der Kern der Arbeiten besteht in der gezielten Druckentlastung - bei niedrigeren Drücken als üblicherweise von Berstventilen oder Materialschwachstellen ausgelöst - durch geeignete Ventile und eine optimierte Strömungsführung mit den Zielen, dass die ausströmenden Gase bei Erreichen einer kritischen Durchmischung mit Sauerstoff bereits ihre Zündtemperatur unterschritten haben und somit der Brandvermeidung.

Die sich aus den vorgeschlagenen Arbeiten ggf. ergebenden Verbesserungen bzgl. der Früherkennung eines TR stehen nicht im Fokus der Arbeiten, geben aber voraussichtlich wichtige Erkenntnisse für Modifikationen an Batteriemanagementsystemen (BMS) und der Sensorik. Sicherheitsrisiken, die sich aus der mechanischen Zerstörung von Zellgehäusen bei Unfällen ergeben, werden nicht betrachtet, weil diese primär durch den mechanischen Schutz der Zellen entsprechend den Anforderungen des „Electric Vehicle GTR Test Development, Validation, and Assessment“ [4] reduziert werden müssen.

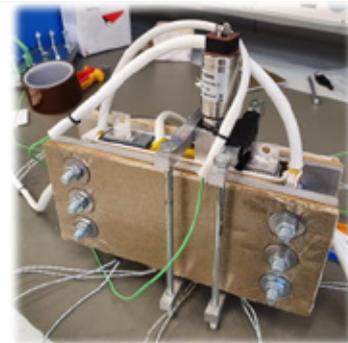
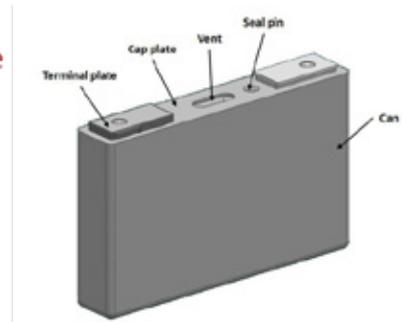
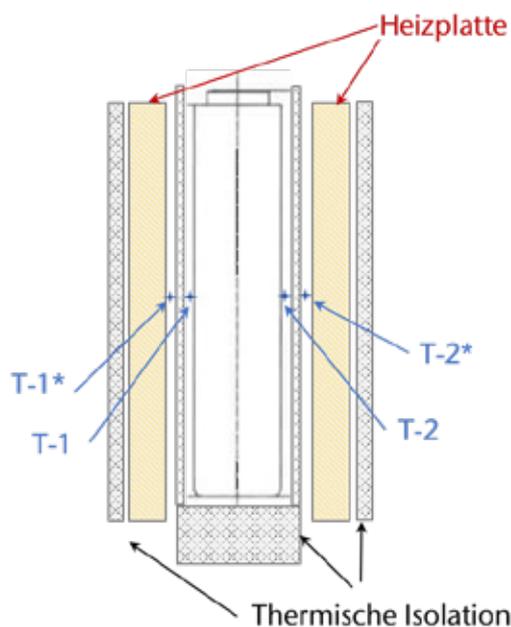
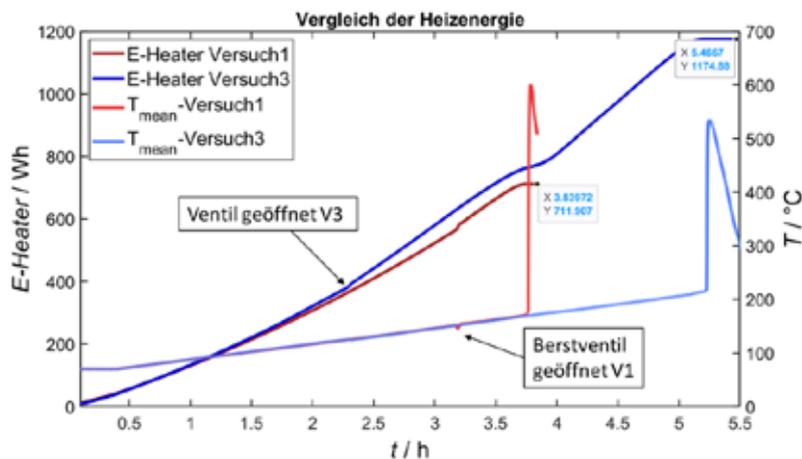


Abbildung 4: Technische Zeichnung der Zelle mit Position der Temperatursensoren und Heizplatten für die Messung und Foto der Zelle mit verbautem Ventil und Drucksensor.



Messgröße	Referenzversuch (V1)	Proof-of-concept (V3)	Verbesserung
TR Starttemperatur in °C	178	217	+39 K
T_{\max} Zelle in °C	644	543	-101 K
T_{\max} Abgas in °C	683	504	-179 K
T_{Zelle} bei Berstöffnung in °C	158	215	+67 K
Energiezufuhr in Wh	712	1175	+463 Wh (+65 %)
Massenverlust Δm in g	329,2	176,8	-152 g (-18,8 %)

Abbildung 6: Versuchsparameter und Temperaturentwicklung bei zugeführter Heizenergie von Lithium-Ionen-Zellen ohne (V1) und mit (V3) zusätzlichem Sicherheitsventil beim Thermal Runaway.

Die zu diesem Projekt durchgeführten Voruntersuchungen der gezielten Druckentlastung mit kommerziellen Zellen haben gezeigt, dass eine industrielle Umsetzung des Konzepts für prismatische Lithium-Ionen-Zellen realisierbar ist. Für Rundzellen sollte das Konzept übertragbar sein, sofern auf dem Zelldeckel Raum für eine Ventilintegration zusätzlich (oder anstelle) des Berstventils vorhanden ist. Die Anpassung des Konzepts auf Pouchzellen erscheint grundsätzlich möglich.

Industrielle Zellen (Samsung, 37 Ah) wurden soweit manipuliert, dass ein internes Sicherheitselement gegen Überdruck deaktiviert wurde. Auf der Oberseite der Zellen befindet sich eine mit Epoxydharz verschlossene Öffnung, die während des Produktionsprozesses zum Befüllen der Zelle mit Elektrolyt benutzt wird. Diese Öffnung wird freigelegt und mit einem Messblock verschlossen, welcher einen Temperatursensor, einen Drucksensor und ein elektromagnetisches Ventil, das bei verschiedenen Drücken geöffnet werden kann, enthält.

Am Zellgehäuse sind mehrere Thermoelemente sowie ein Dehnungsmessstreifen zur Druck-

bestimmung angebracht. Über die gesamte Versuchsdauer wird die Spannung der Zelle gemessen.

Die Auslösung eines TR erfolgt durch langsames, gleichmäßiges Hochheizen einer Zelle mit 0,5 K/s mittels Heizplatten, die auf beiden Flächen der Zelle angebracht sind. Die Heizung wird abgebrochen, wenn die Zelle mehr Wärme freisetzt, als ihr von außen zugeführt wird.

Die ersten Versuche haben gezeigt, dass durch die gezielte Druckentlastung (bei 130 °C, 2,6 bar) der Zelle der TR zeitlich, zu größeren Temperaturen und vor allem deutlich erhöhter Energiezufuhr hin herausgezögert sowie die Temperaturen der Zelle, der ausströmenden Gase und die Menge der Gase reduziert werden können (siehe Abb. und Tabelle xc).

Dass eine Druckentlastung die Gefahr des Thermal Runaway maßgeblich verringert, zeigt ebenso [5]. Auch die Veränderung des Querschnitts der Berstöffnung [2] hat Auswirkungen auf das Brandrisiko. Die Verwendung von Schäumen zur Herstellung von Strömungskanälen, so dass die aus der Zelle austretenden

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

VentBatt: Erhöhung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien durch ein innovatives, ventilgesteuertes Gas- und Thermomanagement

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung und Forschung

Förderkennzeichen:

03XP0535A

Projektlaufzeit:

01.05.2023 – 30.04.2026

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

Projektbearbeiter:

Timo Reichrath, B.Sc.



Ralf Bengler



Timo Reichrath

Gase abkühlen können sowie verdünnt werden und gleichzeitig kein zündfähiges Gemisch entsteht, eröffnet weitere Möglichkeiten. Die verwendeten Schäume können bei ggf. leicht veränderten Kompositionen gleichzeitig als Vibrationsschutz, Luftfilter und Feuchtigkeitsabsorbent eingesetzt werden. Darüber hinaus ist auch die Nutzung als oder in Kombination mit einem wärmeabsorbierenden Material zumindest vorstellbar.

Projektkonsortium

Das EST ist Konsortialführer des Projekts. Weiterer Projektpartner ist die Fa. Frötek Kunststofftechnik GmbH aus Osterode, die sich mit der Entwicklung der Ventile im Projekt beschäftigt. Die Fa. Teubert Maschinenbau aus Blumberg entwickelt Partikelschäume zur gezielten Gasführung der austretenden Stoffe, um ein zündfähiges Gemisch zu vermeiden. Die Firmen UniverCell Holding GmbH aus Flintbek und die BorgWarner Akasol GmbH aus Darmstadt setzen die entwickelten Konzepte auf Zell- bzw. Modulebene um.

Ziele

Das EST untersucht das Abuseverhalten von Lithium-Ionen-Batterien unter besonderer Beachtung der Temperatur- und Druckverhältnisse sowie der Gaszusammensetzung in prismatischen Zellen und koordiniert das Gesamtprojekt.

Die Brand- und Explosionsgefahr ist abhängig vom Verhältnis von Sauerstoff, brennbarem Stoff und Zündtemperatur und soll daher aus diesen unterschiedlichen Richtungen zu einer Havarievermeidung beeinflusst werden.

1. Gezielte Druckentlastung über Ventile

Untersuchung des Havarieverhaltens bei der Verwendung von elektromagnetisch betätigbaren Ventilen, um bei Erreichen eines bestimmten Druck- und Temperaturniveaus (Optimierungsaufgabe innerhalb des Projekts) die Zellen gezielt zu „entlasten“. Die Ergebnisse der Untersuchungen haben unmittelbar Einfluss auf die nötige Beschaffenheit der Partikelschäume (AP2), Auslegung der Elastomerventile (AP 4) und die Konzeption der Kühlung bzw. Propagationsbarrieren für die Umsetzung im Batteriemodul (AP 5).

2. Nutzung von Partikelschäumen zur Minderung der Temperatur und Erniedrigung der Konzentration der brennbaren Gase auf ein Maß unterhalb der Brand- und Explosionsgrenzen

Untersuchung der von Projektpartner Teubert in AP2 entwickelten Technologie hinsichtlich der Beeinflussung der elektrischen Performance und v.a. der Möglichkeiten zur Havarievermeidung.

3. Vorgehensweise für das optimierte Design eines Batteriesystem einschließlich Gehäuse und Strömungsführung unter der Beachtung von Propagationsbarrieren durch Isolationsmaterial, verbesserter Wärmeleitung und/oder forcierter Kühlung

Untersuchung des Havarie- und Propagationsverhaltens in Abhängigkeit von verwendetem Temperatur- und Gasmanagement.

Da die Zusammenhänge zwischen Temperatur und Druck in der Zelle (sofern eine Bestimmung ex situ überhaupt möglich ist), in Abhängigkeit vom Lade- und Gesundheitszustand sowie äußeren Bedingungen und Betriebszustand äußerst komplex sind, sind im Rahmen des Projekts Parameterfelder zu untersuchen, bei denen eine gezielte Beeinflussung von Druck und/oder Temperatur eine Havarie verhindern können. Dazu werden am EST ausführliche Versuchsreihen durchgeführt werden mit Variation von Heizraten bzw. Temperaturgradienten, Ladezustand und Öffnungsdrücken.

Dazu sind die nötigen Voraussetzungen zu schaffen, indem die Zellen und Module entsprechend mit Sensorik und steuerbaren Ventilen ausgestattet werden und die Prüfumgebung angepasst wird.

Arbeitspakete und Projektstand

Die Arbeitspakete sind der Abb. zu entnehmen. Als einer der ersten Schritte wurde sich im Konsortium auf eine prismatische Zelle (NMC622) als Untersuchungsgegenstand geeinigt und die Versuchsmatrix festgelegt.

Derzeit werden die Zellen für die Versuche vorbereitet, indem sie nach einer Eingangskarakterisierung mit Drucksensoren und elektromagnetischen Ventilen ausgestattet werden. Parallel dazu wird die Prüfumgebung vorbereitet, damit die relevanten Größen wie Temperaturen, Drücke, Gasmengen, -geschwindigkeiten und -zusammensetzungen reproduzierbar gemessen werden können.

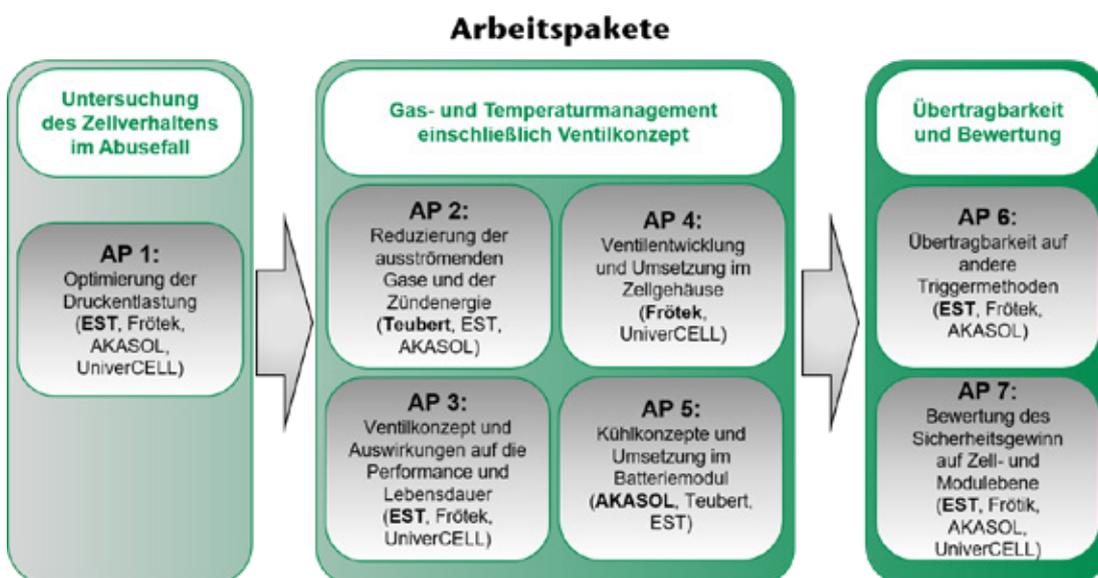


Abbildung 7: Arbeitsinhalte des Verbundprojekts.

CircularLIB: Fibre optical sensors and improved models for state estimation and cell design

Kurzfassung

Durch die Zunahme der Elektromobilität und erneuerbarer Energien im Strommix in Deutschland und auch weltweit nimmt der Bedarf an Lithium-Ionen-Batterien immer weiter zu [1]. Trotz intensiver Suche nach alternativen nachhaltigen Materialien finden sich gerade in den leistungsfähigsten Zellzusammensetzungen kritische Rohstoffe wie Kobalt und Lithium, die als Primärrohstoff unter starker Umweltbelastung und widrigen Arbeitsbedingungen gewonnen werden. Als Anreicherung der benötigten Rohstoffe in der Lithium-Ionen-Batterie am Ende ihrer Lebenszeit eignen diese sich auf theoretischer Basis ideal als Ausgangspunkt zum Recycling zur Produktion neuer Batterien im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Gerade durch die hohen Anforderungen an die Batteriematerialien erfordert die Verfahrensentwicklung zum Recycling zur direkten Resynthese von Batteriematerialien noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit [2]. Neben den umweltschützenden Aspekten der Kreislaufwirtschaft gibt es auch wirtschaftlich aufgrund der zunehmenden Verknappung kritischer Rohstoffe wie Kobalt und dem Gedanken der Rohstoffunabhängigkeit auch ein gesellschaftliches Interesse zum Schließen des Rohstoffkreislaufs. Das Graduiertenkolleg CircularLIB beschäftigt sich deshalb mit jedem einzelnen Schritt im Cradle-to-Cradle-Kreislauf von Lithium-Ionen-Batterien. Die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Materialien, der Zellalterung und den verschiedenen mechanischen, thermischen und chemischen Prozessen während des Recyclings werden verfolgt und mit den Ergebnissen der Materialrückgewinnungs- und -resyntheseschritte verknüpft.

Abstract

With the increase in electromobility and the integration of renewable energy sources into the energy mix in Germany and worldwide, the demand for lithium-ion batteries continues to grow [1]. Despite intensified efforts to search for alternative sustainable materials, rare earth elements are found, particularly in the most

high-performance cell compositions, and they are extracted as primary resources with significant environmental impact and adverse working conditions. Enriching the necessary raw materials within the lithium-ion battery at the end of its life cycle makes them theoretically ideal as a starting point for recycling to produce new batteries in line with the principles of the circular economy. Due to the stringent requirements for battery materials, the development of recycling processes for direct resynthesis of battery materials still requires substantial research and development [2]. In addition to the environmental aspects of the circular economy, there are also economic interests driven by the increasing scarcity of critical raw materials such as cobalt and the concept of resource independence, which motivate the closure of the materials cycle. The CircularLIB Graduate College is therefore dedicated to examining each step within the cradle-to-cradle cycle of lithium-ion batteries. It tracks the numerous interactions between materials, cell aging, and the various mechanical, thermal, and chemical processes during recycling and associates them with the outcomes of material recovery and resynthesis steps.

Projekthintergrund CircularLIB

Um die CO₂-Neutralität zu erreichen und somit die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, ist es ein strategisches Ziel, den individuellen Verkehr von Verbrennungsmotoren zunehmend auf batterieelektrischen Antrieb umzustellen. Daher ist es von größter Bedeutung, die Forschung und Entwicklung von Batterien parallel zur Steigerung der Batterieproduktionskapazitäten zu beschleunigen.

Um die größtmöglichen Vorteile des Übergangs zu batterieelektrischen Fahrzeugen zu erzielen, ist ein möglichst nachhaltiger Batterieproduktionsprozess erforderlich. Ein entscheidender Aspekt ist die Verfügbarkeit der für Lithium-Ionen-Batterien benötigten Ressourcen, die voraussichtlich zu hohen Materialkosten führen. Darüber hinaus gibt es ernsthafte ethische und Umweltbedenken hinsichtlich der Bedin-

gungen beim Abbau einiger dieser Materialien. Andererseits stellen Abfallkomponenten aus gebrauchten Lithium-Ionen-Batterien aufgrund einer Reihe von Schwermetallen und toxischen Bestandteilen Umweltrisiken dar.

Projektziele

Das Ziel ist daher die Etablierung einer kreislauforientierten Batterieproduktion und einer kreislauforientierten Batteriewirtschaft. Kreislauforientierung bedeutet hierbei das möglichst

vollständige Recycling aller kritischen Batteriekomponenten, um den Bedarf an Ressourcen zu minimieren und die Abfallerzeugung zu reduzieren. Um dies zu erreichen, müssen die Batterien nach dem Ende ihrer Nutzungszeit recycelt werden, wodurch ihre Komponentenmaterialien durch Wiederaufbereitung und Resynthese zurückgewonnen werden, was ein geschlossenes Kreislaufsystem schafft. Hierbei wird die Gesamtleistung der Batteriematerialien während der aktiven Lebensphase von besonderem Interesse sein, ebenso wie die Auswirkungen potenzieller Verunreinigungen, die sich über aufeinanderfolgende Recyclingzyklen hinweg anhäufen, auf die Leistung der neu hergestellten Batterien. Derzeit existiert keine vollständige Übersicht des Recyclingzyklus, der einzelne Schritte und den technologischen Prozess, sowie die maximal erreichbare Reinheit der recycelten Materialien, insbesondere über mehrere Recyclingzyklen hinweg, berücksichtigt. Dieses Wissen trägt dazu bei, einen wirtschaftlich rentablen und ökologisch nachhaltigen Batterieproduktionszyklus zu etablieren.

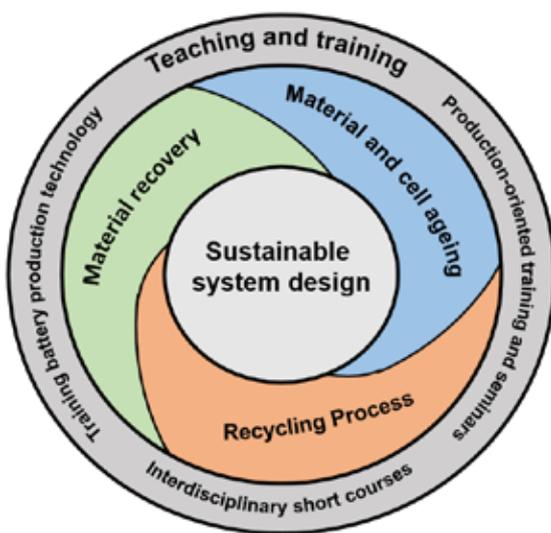


Abbildung 1: Übersicht der abgedeckten Themenbereiche durch das Graduiertenkolleg CircularLIB [3].

Material- & Zellalterung

Am EST wird in diesem Kontext in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus dem Bereich der Material- und Zellalterung ein Projekt zur Charakterisierung der im Projekt an der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) gefertigten Batterien bearbeitet (s. Abbildung 2).

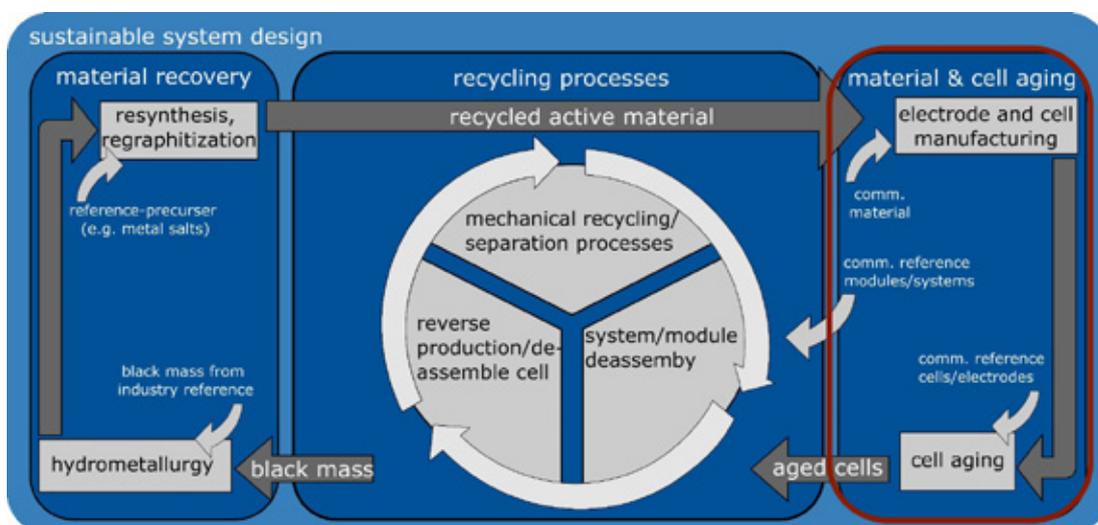


Abbildung 2: Materialpfad innerhalb des Graduiertenkollegs.

In der Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer HHI werden auf dem Energiecampus Goslar Sensoren auf Basis von Faser-Bragg-Gittern (FBG) zur akkuraten Bestimmung des Batteriezustands produziert. Der geringe Formfaktor, geringe Kosten, chemische Stabilität gegenüber dem Elektrolyten und Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen machen diese Sensoren ideal als Anwendung in kompakten Batterieanwendungen. Die in die kommerziellen Glasfasern periodisch gelaserten Gitter erzeugen durch ihren anderen Brechungsindex gegenüber des Glasfaserkerns einen sogenannten Bragg-Spiegel an der eine spezifische Wellenlänge (Bragg-Wellenlänge - λ_B) reflektiert wird (s. Abbildung 3) [4].

Bei Änderung des Gitterabstands (Λ), durch beispielsweise thermische Ausdehnung oder äußerer Krafteinwirkung entlang der Faser, kommt es zu einer Veränderung der Bragg-Wellenlänge. So ermöglicht diese Sensorik eine Untersuchung mechanischer und thermischer Veränderungen des Trägermaterials.

Die FBG-Sensoren werden mit hoher Präzision an und auch in den gefertigten Batteriezellen eingesetzt, um möglichst detaillierte Informationen zu den thermischen und mechanischen Belastungen aufgrund der gewählten Materialien und Betriebsbedingungen zu gewinnen. Um die Hintergründe der beobachteten Phänomene eindeutig zu bestimmen, wird ein physikalisches-chemisches Modell zur Beschreibung der elektrochemischen, thermischen und mechanischen Vorgänge in der Batterie erstellt, um die beobachteten Phänomene direkt auf die Materialwahl und Betriebsbedingungen zurückzuführen (s. Abbildung 4).

Die vollständige Performanceanalyse des gewählten Materialmixes mit Ergänzung elektrochemischer Charakterisierungsmethoden aus dem Graduiertenkollegs unterstützen so die Bestimmung sinnvoller Anforderungen an resynthetisierte Batteriematerialien.

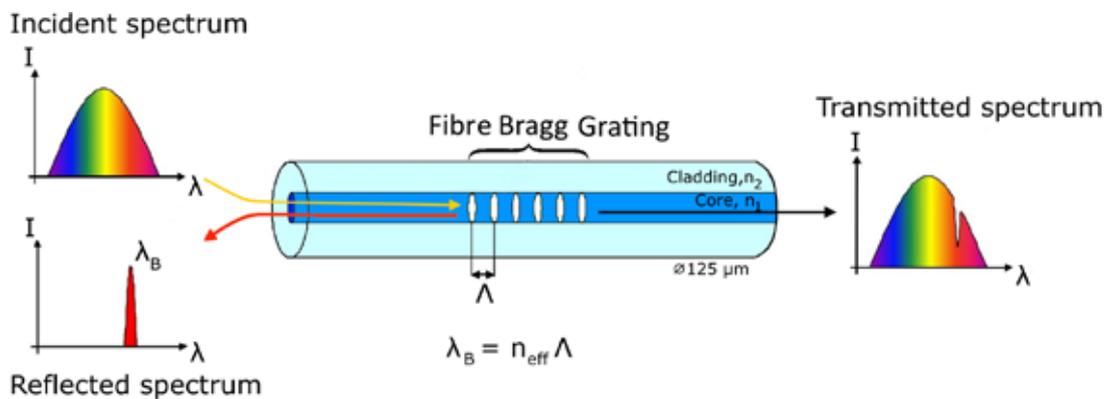


Abbildung 3: Funktionsweise eines Faser Bragg Gitter Sensors. Abbildung basierend auf [5].

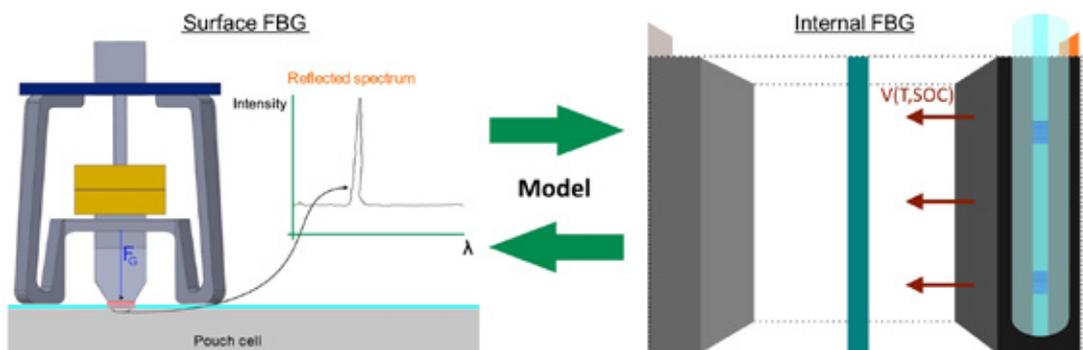


Abbildung 4: Konzept zur Modellierung zur Beschreibung der gemessenen Batteriezustandsgrößen während des Betriebs.

Literatur

- [1] F. Degen, M. Winter, D. Bendig, J. Tübke: Nat. Energy, in press. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01355-z>.
- [2] C. Liu, J. Lin, H. Cao, Y. Zhang, Z. Sun, J. Clean. Prod. 2019, 228, 801 – 813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.304>.
- [3] <https://www.tu-braunschweig.de/en/circularlib/about-us> (Accessed on November 02, 2023).
- [4] M. M. Werneck, R. C. S. B. Allil, B. A. Ribeiro, F. V. B. de Nazaré, M. M., R. C. S. B. Allil, B. A., F. V. B. de Nazar: Current Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings (Eds: C. Cuadrado-Laborde), InTech 2013.
- [5] V. G. Schlüter: Entwicklung eines experimentell gestützten Bewertungsverfahrens zur Optimierung und Charakterisierung der Dehnungsübertragung oberflächenapplizierter Faser-Bragg-Gitter-Sensoren, BAM-Dissertationsreihe, Vol. 56, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin 2010.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

CircularLIB - Fibre optical sensors and improved models for state estimation and cell design

Fördermittelgeber:

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur und die VolkswagenStiftung

Förderkennzeichen:

ZN3678

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2022 – 01.01.2025

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek,
Prof. Wolfgang Schade

Projektbearbeiter:

André Hebenbrock, M.Sc.



Thomas Turek



Wolfgang Schade



André Hebenbrock

Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden

Kurzfassung

Piezoelektrische Bauelemente sind ein integraler Bestandteil moderner Geräte, die in verschiedenen Bereichen von Wissenschaft und Technik sowie im täglichen Leben breite Anwendung finden. Piezoelektrische Aktuatoren und Sensoren, die auf elektromechanischen Messprinzipien basieren, sind von großer Bedeutung, da sie aufgrund ihrer Langzeitstabilität, hohen Betriebstemperaturen und kurzer Ansprechzeit häufig in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie in anderen industriellen Prozessen unter rauen Bedingungen eingesetzt werden können.

Eine Frage betrifft die speziellen Eigenschaften aller piezoelektrischen Materialien: Ist es möglich, ihre Materialcharakteristik gezielt zu modifizieren, um ihre Anwendungsfenster zu erweitern? Ein möglicher Lösungsweg besteht darin, verschiedene Kristalle mit ähnlicher Struktur aber unterschiedlichen Eigenschaften zu Mischkristallen zu kombinieren, die die Vorteile all ihrer Komponenten in sich vereinen können.

Projektpartner

Projektkoordination:

- Institut für Energieforschung und Physikalische Technologien
- Forschungszentrum Energiespeichertechnologien

Beteiligte Forschungseinrichtungen:

- 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

In diesem Projekt werden $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ -Mischkristalle untersucht, die aus zwei künstlichen Kristallen, Lithiumniobat LiNbO_3 (LN) und Lithiumtantalat LiTaO_3 (LT), bestehen, die beide die Raumgruppe $R3c$ aufweisen. Es wird erwartet, dass solche Mischkristalle die hohen piezoelektrischen Koeffizienten von Lithiumniobat mit der verbesserten thermischen Stabilität von Lithiumtantalat kombinieren. Im Rahmen des Projekts werden grundlegende Merkmale von $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ -Mischkristallen in Abhängigkeit von Temperatur und Sauerstoffpartialdruck ($p\text{O}_2$) bei Temperaturen bis zu $900\text{ }^\circ\text{C}$ analysiert.

Abstract

Piezoelectric devices are an integral part of modern devices that are widely used in various fields of science and technology as well as in daily life. Piezoelectric actuators and sensors based on electromechanical sensing principles are of great importance because their long-term stability, high operating temperatures, and short response time mean that they can often be used in the aerospace industry and in other industrial processes under harsh conditions.

One question concerns the special properties of all piezoelectric materials: Is it possible to specifically modify their material characteristics to expand their application window? One possible solution is to combine different crystals with a similar structure but different properties into solid solutions that can merge the advantages of all their components.

In this project, $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solutions derived from two artificial crystals, lithium niobate LiNbO_3 (LN) and lithium tantalate LiTaO_3 (LT), both with space group $R3c$, are investigated. Such solid solutions are expected to combine the high piezoelectric coefficients of lithium niobate with the improved thermal stability of lithium tantalate. Within the project, fundamental features of $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ solid solutions will be analysed as a function of temperature and oxygen partial pressure ($p\text{O}_2$) at temperatures up to $900\text{ }^\circ\text{C}$.

Projektziele

Das Ziel dieses Projekts besteht darin, die Korrelation zwischen der Zusammensetzung von $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ -Mischkristallen (LNT) und ihren Eigenschaften bei Temperaturen bis zu $900\text{ }^\circ\text{C}$ zu untersuchen. Wichtige Materialeigenschaften werden erheblich von Defekten beeinflusst, unabhängig davon, ob sie natürlichen Ursprungs sind oder gezielt geschaffen wurden. Diese Defekte führen zu Veränderungen des Ladungstransports, der akustischen Verluste, des Polarisationsverhaltens, der mechanischen Reaktion und der Langzeitstabilität des Materials. Um die gewünschten Eigenschaften von Bauelementen, die auf LNT basieren, zu erreichen, ist eine präzise Kontrolle der Defekte erforderlich. Daher ist es notwendig, insbesondere die ionischen und elektronischen Defekte zu verstehen.

Bisherige Forschungstätigkeiten

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Leitfähigkeiten, die Curie-Temperaturen, die akustischen Verluste sowie die Stabilität von unterschiedlichen LNT-Konfigurationen in Abhängigkeit der Temperatur und des Sauerstoffpartialdrucks untersucht. Zu diesem Zweck wurden Pt-Elektroden auf den Kristallen aufgebracht (siehe Abb. 1a) und die Proben wurden für die Messungen bei hohen Temperaturen in einem Probenhalter fixiert und kontaktiert (siehe Abb. 1b)).

Phasenumwandlungen nahe der Curie-Temperatur können durch die momentane Änderungsrate der Aktivierungsenergie ($E_{\sigma T}$) von der Temperatur bestimmt werden (siehe Abb. 2). Aktivierungsenergie (E_A) wird nur aus Bereichen mit konstanten Beträgen von $E_{\sigma T}$ ermittelt. Diese Aktivierungsenergie wurde aus der

Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS) berechnet. In Abb. 2 sind die so ermittelten Abhängigkeiten einiger LN-, LT- und LNT-Proben dargestellt. Im Folgenden werden die Kristalle als „LNTx“ bezeichnet, wobei „x“ der prozentuale molare Anteil von Ta in Bezug auf Ta und Nb ist. Beispielsweise steht „LNT12“ für $\text{LiNb}_{0,88}\text{Ta}_{0,12}\text{O}_3$. Die zusätzliche Nummerierung in den Probenamen weist lediglich auf die unterschiedliche Herkunft der Kristalle hin.

Die Aktivierungsenergie der LNT50-Probe liegt von 450 bis etwa $700\text{ }^\circ\text{C}$ bei $1,31\text{ eV}$ (siehe Abb. 2, grüne Kurve). Diese Beobachtung entspricht den Erwartungen, dass die Curie-Temperatur von LNT-Mischkristallen höher als die von LT oberhalb $600\text{ }^\circ\text{C}$ ist, was in der Abb. 2 durch die sprunghafte Änderung der Aktivierungsenergie für beide LT Proben zu sehen ist [1].

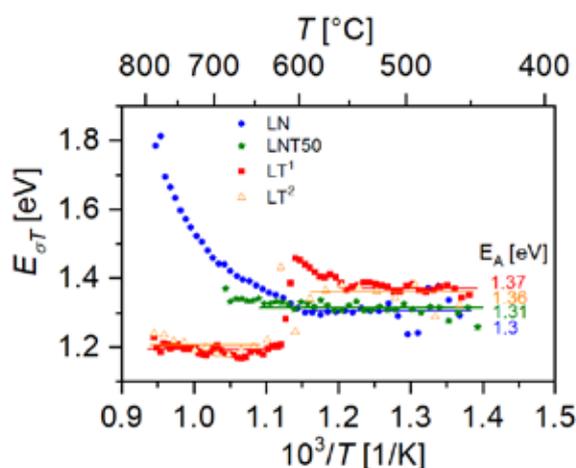


Abbildung 2: Die Abhängigkeit der Aktivierungsenergie von LN, LT und LNT von der Temperatur an Luft. 1- Leibniz-Institut für Kristallzüchtung, 2 - Precision Micro-Optics, Inc.

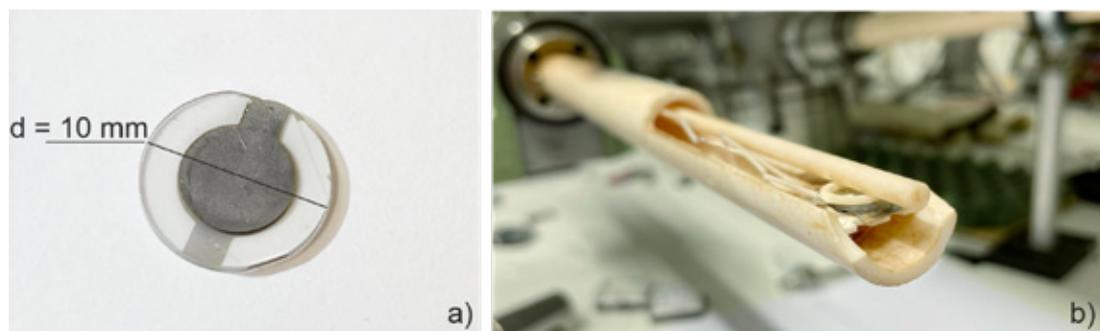


Abbildung 1: a) Eine typische LNT-Probe (Y-Schnitt $\text{LiNb}_{0,3}\text{Ta}_{0,7}\text{O}_3$) mit Pt-Elektroden; b) Ein Hochtemperatur-Keramik-Probenhalter mit der Probe aus a).

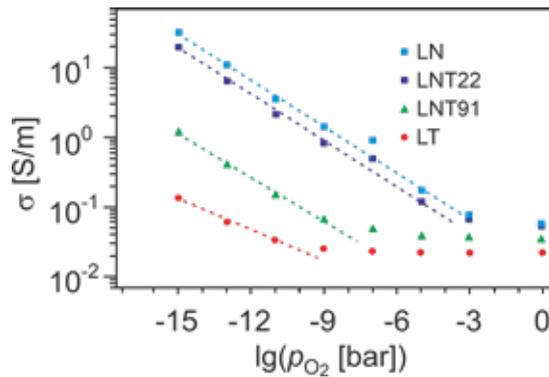


Abbildung 3: Leitfähigkeit von LN, LT und LNT in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes bei 900 °C.

Es wurde auch der Beitrag der ionischen und der elektronischen Leitfähigkeit zur Gesamtleitfähigkeit bestimmt. Dazu wurden Leitfähigkeitsmessungen bei verschiedenen Sauerstoffpartialdrücken durchgeführt (siehe Abb. 3). Der O₂-Partialdruck im Ofen wurde mit einem zweistufigen Regelkreis mit elektrochemischen Sauerstoffpumpen geregelt. Als Trägergasgemisch wurde Wasserstoff in Argon verwendet, in das Sauerstoffpumpen die erforderlichen Sauerstoffmengen titrierten, um die vorgegebenen Partialdrücke zu erreichen.

Der konstante Bereich der Kurven (Abb. 3) bei höheren pO₂ deutet auf die Dominanz der ionischen Leitfähigkeit in diesem Bereich hin. Bei niedrigen pO₂ gibt der Anstieg der Kurven Aufschluss über den Mechanismus der elektronischen Leitfähigkeit.

Bei einer Temperatur von 900 °C und einem pO₂ von 0,2 bar zeigt LN eine gemischte Leitfähigkeit. Während die ionische Leitfähigkeit überwiegt, ist trotzdem ein geringer Anteil an elektronischer Leitfähigkeit festzustellen. Bei einer Verringerung des pO₂ wird der elektronische Beitrag zur Leitfähigkeit größer und wird schließlich in allen untersuchten Proben dominant.

LT und LNT71 zeigen eine pO₂-unabhängige Leitfähigkeit bis zu einem Druck von 10⁻¹⁰ bar, was darauf hinweist, dass beide weniger leicht reduzierbar als LN sind. Der Anstieg für alle Proben von ca. -1/4 bei niedrigem Sauerstoffpartialdruck weist auf ein Defektmodell hin, das nicht mit der Ausgasung von Li₂O verbunden ist.

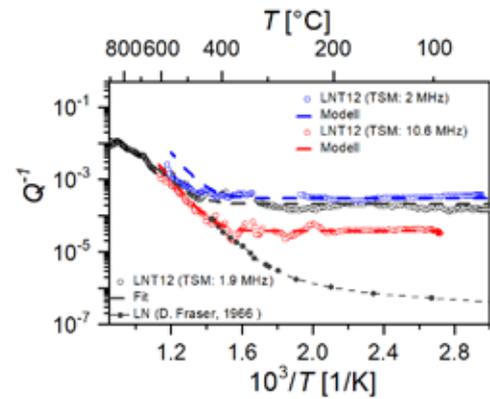


Abbildung 4: Die gemessenen temperaturabhängigen akustischen Verluste Q⁻¹; der Gesamtverlust, modelliert aus Defektmodell; Fit an der Literatur Daten [2]. TSM – Thickness shear mode.

Bei mittleren Sauerstoffpartialdrücken (zwischen 10⁻¹⁰ und 10⁻¹⁵ bar) hat die Zusammensetzung des Mischkristalls den größten Einfluss auf den Leitungsmechanismus. Dies deutet darauf hin, dass die elektrischen Eigenschaften dieser Materialien durch Anpassung des Nb/Ta-Verhältnisses und des pO₂ kontrolliert und gezielt eingesetzt werden können.

Die akustischen Verluste Q⁻¹ von LNT-Resonatoren wurden in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich von 200 – 900 °C mittels resonanter piezoelektrischer Spektroskopie untersucht (siehe Abb. 4). Bis zu Temperaturen von 200 – 250 °C ist ein konstanter Wert von Q⁻¹ zu erkennen. Bei Temperaturen oberhalb von 400 °C werden die akustischen Verluste durch die Relaxation piezoelektrisch angeregter Ladungsträger verursacht [3]. Dies deutet darauf hin, dass die Verringerung der akustischen Verluste bei Temperaturen oberhalb von 400 °C durch eine Verringerung der Leitfähigkeit erreicht werden kann.

Literatur

- [1] U. Yakhnevych, C. Kofahl, S. Hursky, S. Ganschow, Y. Suhak, H. Schmidt, H. Fritze: Charge transport and acoustic loss in lithium niobate-lithium tantalate solid solutions at temperatures up to 900 °C. *Solid State Ionics* 2023, 392, 116147, ISSN 0167-2738.
- [2] D. B. Fraser, A. W. Warner: Lithium Niobate: A High-Temperature Piezoelectric Transducer Material. *Journal of Applied Physics* 1966, 37, 3853-3854.
- [3] Y. Suhak, D. Roshchupkin, B. Redkin, A. Kabir, B. Jerliu, S. Ganschow, H. Fritze: Correlation of Electrical Properties and Acoustic Loss in Single Crystalline Lithium Niobate-Tantalate Solid Solutions at Elevated Temperatures. *Crystals* 2021, 11, 398.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Forschungsgruppe FOR 5044: Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Förderkennzeichen:

FR1301/42

Laufzeit des Vorhabens:

01.02.2021–31.01.2025

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Holger Fritze

Projektbearbeiter:innen:

Dr. Uliana Yakhnevych
Fatima E. El Azzouzi, M.Sc.

Webseite:

www.for5044.de

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

Kurzfassung

Wind und Solarkraft sind für Zeiten geringen Sonnenscheins und Flaute auf Pufferspeicher angewiesen. Neben Batteriespeichern soll die Energie vor allem chemisch in Form von Wasserstoff gespeichert werden, allerdings stellt der eingeschränkte Wirkungsgrad der Verfahren noch ein Problem dar.

In Projekt FemtoPEM soll die Optimierung der Protonenaustausch-Elektrolyse (PEM-EL) erprobt werden. Im Fokus steht hier die poröse Transportschicht (PTL), die an Strom-, Wasser- und Gastransport in der Zelle beteiligt ist und somit eine wichtige Rolle bei allen Prozessen spielt.

Es werden unterschiedlichste Optimierungsverfahren untersucht, um das wichtige Inter-

face zwischen PTL und Katalysatorschicht zu verbessern: Oberflächenstrukturierung mittels Femtosekundenlaser, mit der auch die Oberflächenchemie gezielt verändert werden kann, Beschichtung der Komponente mittels Sputterverfahren, Schliff und viele mehr. Weiterhin soll ein umfassendes Verständnis dafür geschaffen werden, wie die PTL mit der Katalysatorschicht interagiert, um Verlustmechanismen zu charakterisieren.

Abstract

Wind and solar power are dependent on buffer storage for times of low sunshine and calm. In addition to battery storage, the energy is primarily to be stored chemically in the form of hydrogen, although the limited efficiency of the process still poses a problem.

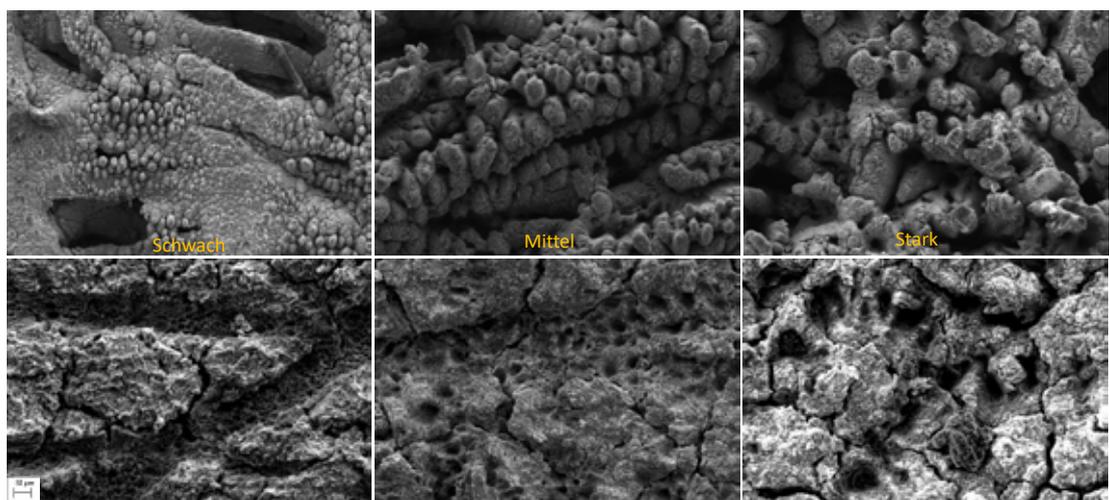


Abbildung 1: REM-Aufnahmen unterschiedlich stark strukturierter PTLs (oben) und der dazugehörigen Katalysatorschicht nach Verpressung. Bei schwacher Strukturierung drücken sich die Fasern tief ein und können die Schicht beschädigen, mittlere Strukturierung senkt dieses Risiko und bietet gleichzeitig mehr Kontaktfläche durch die Struktur, zu starke Strukturierung verhindert gleichmäßige Anpressung durch zu hohe Konen.

In the FemtoPEM project, the optimisation of proton exchange electrolysis (PEM-EL) is to be tested. The focus here is on the porous transport layer (PTL), which is involved in the transport of electricity, water and gas in the cell and therefore plays an important role in all processes.

Various optimisation methods are being investigated in order to improve the important interface between the PTL and the catalyst layer: Surface structuring using femtosecond lasers, with which the surface chemistry can also be specifically changed, coating of the component using sputtering processes, grinding and many more. Furthermore, a comprehensive understanding of how the PTL interacts with the catalyst layer is to be created in order to characterise loss mechanisms.

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, zum anderen an den für die PTL benötigten korrosionsbeständigen Materialien. Während für eine PEM-Brennstoffzelle preisgünstiger Kohlenstoff verwendet werden kann, würden die stark sauren Verhältnisse in einer PEM-EL-Zelle 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, allerdings auch einen hohen elektrischen Widerstand.

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.

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.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes ist es, die Interaktionen zwischen PTL und Katalysatorschicht zu analysieren und verstehen, um zukünftige Optimierungen zu vereinfachen. Hierfür ist vor allem das Eindrücken-Verhalten der harten PTL in die weiche Katalysatorschicht entscheidend, da ein zu starkes Eindrücken Katalysator oder Membran beschädigen kann, zu geringes Eindrücken jedoch den elektrischen Kontakt behindert.

Projektstand

Im Laufe des Projekts wurden zahlreiche Kombinationen von Oberflächenstrukturierungen und Beschichtungen erprobt. So konnte ein positiver Einfluss von Laserstrukturierung, Iridium-Beschichtung und Schleifen der Oberfläche nachgewiesen werden. Das Optimierungspotential durch die Laserstrukturierung wird leider durch ein sehr enges Parameter-Fenster begrenzt, während die gleichzeitige Einbringung von Edelmetallen zwar möglich (bis zu 10 at.-% Ruthenium, 2% Iridium) ist, jedoch durch hohen Materialabtrag zurzeit kaum wirtschaftlich. Aus diesem Grund wird im fortlaufenden Projekt wieder auf eine nachträgliche, dünne Beschichtung zurückgegriffen. Nichtsdestotrotz konnte ein sehr positiver Einfluss der Integration auf die Korrosionsrate der laserbehandelten Oberflächen nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse sollen zeitnah publiziert werden.

Die chemische Oberflächenmodifizierung während des Laserprozesses soll weiterhin vor allem durch das Prozessgas erfolgen. Die Erzeugung von Titanitrid durch Prozessierung unter Stickstoffatmosphäre zeigte sich bisher als am vielversprechendsten, weiterhin soll in Zukunft die Erzeugung von Titanhydrid durch ein 95/5 N/H-Atmosphäre erprobt werden.

Weitere vielversprechende Oberflächenoptimierungen sind das Schleifen der PTL-Oberfläche mittels angerauter Titan-Folie, um einen gleichmäßigeren Kontakt zur Katalysatorschicht zu gewährleisten. Der Effekt des Schleifens bleibt auch nach anschließender Laserstrukturierung bestehen und sorgt somit für ein gleichmäßigeres Ergebnis.

Es sind noch längst nicht alle Möglichkeiten zur Optimierung der PTL ausgeschöpft. Aus diesem Grund läuft das Antragsverfahren für ein Nachfolgeprojekt, in dessen Rahmen eng mit der Industrie zusammengearbeitet werden soll, um die erprobten Verbesserungen auf eine industrielle Anwendbarkeit zu skalieren.

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:

Bundesamt 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

InnoEly: Innovationslabor Wasserelektrolyse: Modellierungs- und Charakterisierungswerkzeuge für die Entwicklung von Wasserelektrolyseuren – vom Material zum System

Kurzfassung

Zusammen mit assoziierten Industriepartnern soll ein Modellierungs- und Charakterisierungswerkzeugkasten für Komponenten und Systeme dreier Wasserelektrolysestechnologien entwickelt werden. Alkalische (AEL), Protonenaustauschmembran- (PEM), und Hochtemperatur- (HTEL) Wasserelektrolyse wird auf Zell-, Stack- und Systemebene modelliert und in einem einheitlichen Auslegungstool für Anwender vergleichbar hinterlegt. Bestehende experimentelle Charakterisierungsmöglichkeiten werden harmonisiert, damit die Technologien besser vergleichbar werden. Neuartige Messdaten gehen in die Modelle ein.

Die Materialentwicklung wird anhand der AEL als Fallbeispiel durchgeführt und geht über die neuen Messungen in die Modellierungen ein. Durch die direkte Verknüpfung der Modellierung mit der Materialentwicklung und der Zellcharakterisierung können zukünftige Entwicklungen auf Basis der modelltheoretischen Betrachtungen leichter erkannt und evaluiert werden.

Projektpartner

- Leibniz Universität Hannover (LUH)
- Technische Universität Clausthal (TUC)
- Institut für Solarforschung Hameln (ISFH)
- Technische Universität Braunschweig (TUBS)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (UOL)
- Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut

Abstract

Together with associated industrial partners, a comprehensive modelling and characterization toolbox for components and systems of all three relevant water electrolysis technologies will be developed. Alkaline (AEL), proton exchange membrane (PEM), and high temperature (HTEL) water electrolysis systems will be modeled at the cell, stack, and system level and provided in a standardized, comparable design tool for users. Existing experimental characterization is harmonized to make the technologies more comparable. New types of measurement data are incorporated into the models.

Material development is carried out using the AEL as a case study and is incorporated into the modeling via the new measurements. By directly linking the modelling with material development and cell characterization, future developments can be more easily identified and evaluated on the basis of the modeltheoretical considerations.

Hintergrund

Ein effizienter und ökonomischer Betrieb von Wasserelektrolyseuren ist nur durch eine sinnvolle Systemdimensionierung und Materialauswahl der Komponenten zu realisieren, die durch den Charakterisierungs- und Modellierungswerkzeugkasten des Projektes gewährleistet werden. Dies ist insbesondere für Unternehmen in den Bereichen Komponententwicklung (Fa. Eisenhuth GmbH & Co. KG/Osterode) sowie für Unternehmen im Bereich Elektrolyseurbau (Fa. IAV GmbH/Gifhorn, Fa. JA-Gastechology/Großburgwedel (JAG) und Fa. sunfire GmbH/Dresden) von großer Bedeutung. Auf der anderen Seite ist eine sinnvolle Technologiewahl und Anlagenintegration für Elektrolysebetreiber und H₂-Nutzer von Relevanz (Fa. Salzgitter Mannesmann Forschung

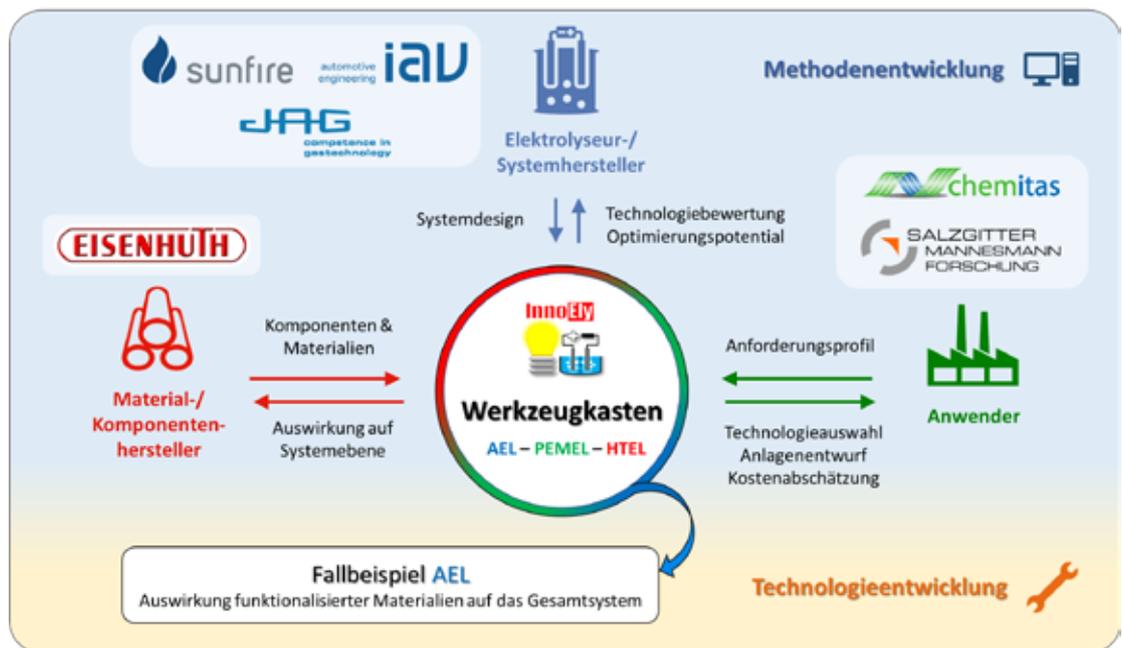


Abbildung 1: Der InnoEly-Werkzeugkasten berücksichtigt die Sichtweisen und Fragestellungen der Anwender, der Systemhersteller sowie der Material- und Komponentenhersteller und wird anhand der AEL-Technologie im Rahmen eines Fallbeispiels getestet.

GmbH/Salzgitter und Fa. Chemitas GmbH/Goslar). Im Konsortium sind daher Hersteller aller drei Wasserelektrolysetechnologien (AEL, PEMEL, HTEL) und Industrie-partner auf System- und Elektrolyseurbetreiberseite vertreten. Eine schematische Darstellung der Projekthalte zeigt Abbildung 1.

Das Fallbeispiel für die entwickelten Methoden im Werkzeugkasten sind originäre Methoden der Partner zur Materialfunktionalisierung für die alkalische Wasserelektrolyse:

- Funktionalisierung der Elektrodenoberflächen durch einen Ultrakurzpulslaserprozess (Forschungszentrum Energiespeichertechnologien, TUC)
- Funktionalisierung über eine Sprühbeschichtung (Institut für technische Thermodynamik, DLR)
- Funktionalisierung über eine Nanostrukturierung (Institut für Chemie, UOL)

Diese Methoden werden zum ersten Mal auf gleichen Ausgangsmaterialien angewendet und mit gleichen Bedingungen in einer elektrochemischen Zelle charakterisiert. Gleichzeitig finden an der TU Braunschweig grundlegende elektrochemische Untersuchungen statt, die das Verständnis von grundlegenden

Mechanismen in der Elektrolyse verbessern. Mit diesen Daten wird das Modell getestet und Auswirkungen der Komponenten auf die Systemperformance bewertet.

Projektstand

Zell- und Stackmodelle aller 3 Elektrolysetechnologien sind fertig und in einer Expertensoftware zusammengefasst, welche mit der Systemmodellierung verknüpft wird. Das Systemmodell wird mit einer Datenbank realer Bauteile und Kennwerten verknüpft. Zum ersten Mal wurden experimentelle Zell- und Stackdaten harmonisiert charakterisiert und Bezugsgrößen vergleichbar abgebildet. Bisher ist eine deutliche Verbesserung der Elektrolyseperformance im Vergleich zu benutzten Referenzen eingetreten. Konkret wurde eine Verringerung der Überspannung um einen Faktor zwei für eine funktionalisierte Nickelnetzelektrode im Vergleich zu einer unbearbeiteten Nickelnetzreferenz für die Sauerstoffentwicklungsreaktion bei der alkalischen Wasserelektrolyse gemessen. Mit den Ergebnissen des Projektes ist es möglich das Gesamtdesign von Wasserelektrolyseanlagen auf Basis einer umfassenden technologiebewertung zu optimieren. Es wird möglich sein, Komponenten und Systemdimensionie-

rungen spezifisch nach der Anwendung auszuliegen und dabei konkrete Ziele für die Material- und Komponentenentwicklung inklusive deren Auswirkungen auf die Systemebene abzuleiten.

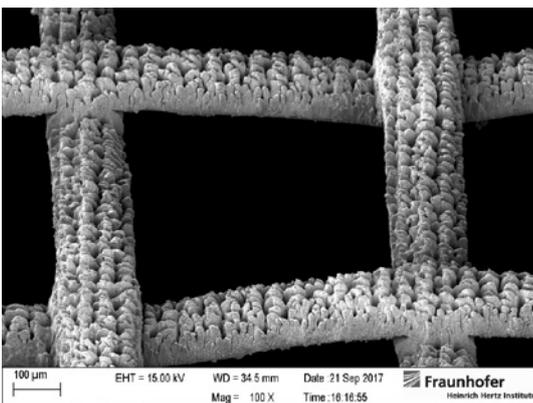
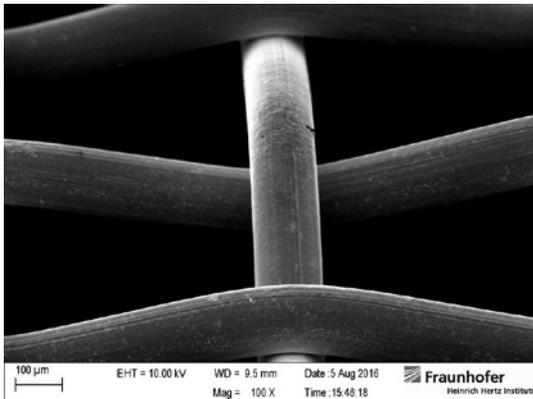


Abbildung 2. Vergleich einer unbearbeiteten Nickelnetzprobe als Referenz (oben) zu einer femtosekundenlaser-funktionalisierten Nickelnetzelektrode (unten). Die Netzdrähte haben eine Breite von etwa 0.1mm.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

InnoEly, Innovationslabor Wasserelektrolyse: Modellierungs- und Charakterisierungswerkzeuge für die Entwicklung von Wasserelektrolyseuren – vom Material zum System

Fördermittelgeber:

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur

Förderkennzeichen:

Sondermittel VW-Vorab-2021-19

Projektlaufzeit:

01.05.2021 – 29.05.2024

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektbearbeiter:

Viktor Hoffmann, M.Sc.



Thomas Gimpel



Viktor Hoffmann

BLaserKat: Blasenablösecharakteristik und Langzeitstabilität von femtosekundenlaserlegierten Elektrokatalysatoren

Kurzfassung

Da Energie aus regenerativen Quellen über den Tages- und Jahresverlauf stark fluktuiert und somit nicht zeitunabhängig im gewünschten Maße verfügbar ist, bedarf es adäquaten Speicherlösungen. Als langfristiges Speichermedium mit hoher Energiedichte sind chemische Verbindungen wie Kohlenwasserstoffe oder molekularer Wasserstoff besonders gut geeignet. Dabei lässt sich letztgenannter mithilfe der alkalischen Elektrolyse aus Wasser gewinnen und setzt als Nebenprodukt lediglich molekularen Sauerstoff frei. Um energetische Verluste bei diesem Energiewandlungsprozess zu minimieren, ist man darin bestrebt, die limitierenden Faktoren des Elektrolysevorgangs, die Prozesse an den Elektroden, durch neue Fertigungsverfahren zu katalysieren. Die Femtosekundenlaserlegierung ist ein solches, neu entwickeltes Verfahren. Es ermöglicht Festkörperoberflächen zu strukturieren sowie Fremdelemente aus festen, flüssigen und gasförmigen Quellen während des Prozesses einzuarbeiten und dadurch die intrinsische Aktivität des bearbeiteten Materials zu steigern. Zudem wird durch diese Oberflächenmodifikation das Ablöseverhalten der bei der Elektrolyse entstehenden Gasblasen verbessert, wodurch weitere störende Überspannungseffekte reduziert werden. Mit diesem Projekt soll die Langzeitstabilität und Performanz dieser neu entwickelten Elektroden überprüft und mithilfe einer auf künstlicher Intelligenz entwickelten Software die Gasblasenentwicklung auf Elektroden studiert werden.

Abstract

Since energy from renewable sources fluctuates heavily over the course of the day and year so that it is not available to the desired extent at all times, suitable storage solutions are required. Chemical compounds such as hydrocarbons or molecular hydrogen are particularly suitable as long-term storage media with a high energy density. Hydrogen can be extracted from water

using alkaline electrolysis and releases molecular oxygen as a by-product only. In order to minimize energy losses in this energy conversion process, efforts are being made to catalyze the limiting factors of the electrolysis process, the processes at the electrodes, using new production methods. Femtosecond laser alloying is a newly developed process. It enables solid surfaces to be structured and foreign elements from solid, liquid and gaseous sources to be incorporated during the process, thereby increasing the intrinsic activity of the processed material. In addition, this surface modification improves the detachment behavior of the gas bubbles produced during electrolysis, which reduces further disruptive overpotential effects. The aim of this project is to test the long-term stability and performance of these newly developed electrodes and to study the development of gas bubbles on electrodes using software developed on the basis of artificial intelligence.

Projektstand

Die alkalische Wasserelektrolyse ermöglicht die Verwendung unedler Elektrodenmaterialien wie Nickel, Molybdän und Eisen. Diese weisen jedoch im Verhältnis zu edleren Elementen wie Platin hohe Sauerstoff- und Wasserstoffüberspannungen auf, die sich in hohen Energiekosten äußern. Mithilfe von materialbearbeitenden Prozessen lassen sich diese Überspannungsercheinungen durch Legierungsbildung mit Katalysatorelementen oder durch Oberflächenmodifikationen reduzieren. In diesem Projekt wird ein neues, im EST entwickeltes, Verfahren zur Femtosekundenlaserlegierung angewendet, um sowohl vergrößerte als auch legierte Elektroden in wenigen Schritten nur mit einem Femtosekundenlaser herzustellen. Durch den Laserprozess bilden sich mikro- und nanostrukturierte Oberflächen deren Größe, Form und Verteilung von justierbaren Laserparameter, dem Prozessgas, der Oberflächenbeschaffenheit sowie der Art des Materials selbst abhängig sind. In Abb. 1 sind Oberflächenstrukturen verschiedener Materialien aufgeführt.

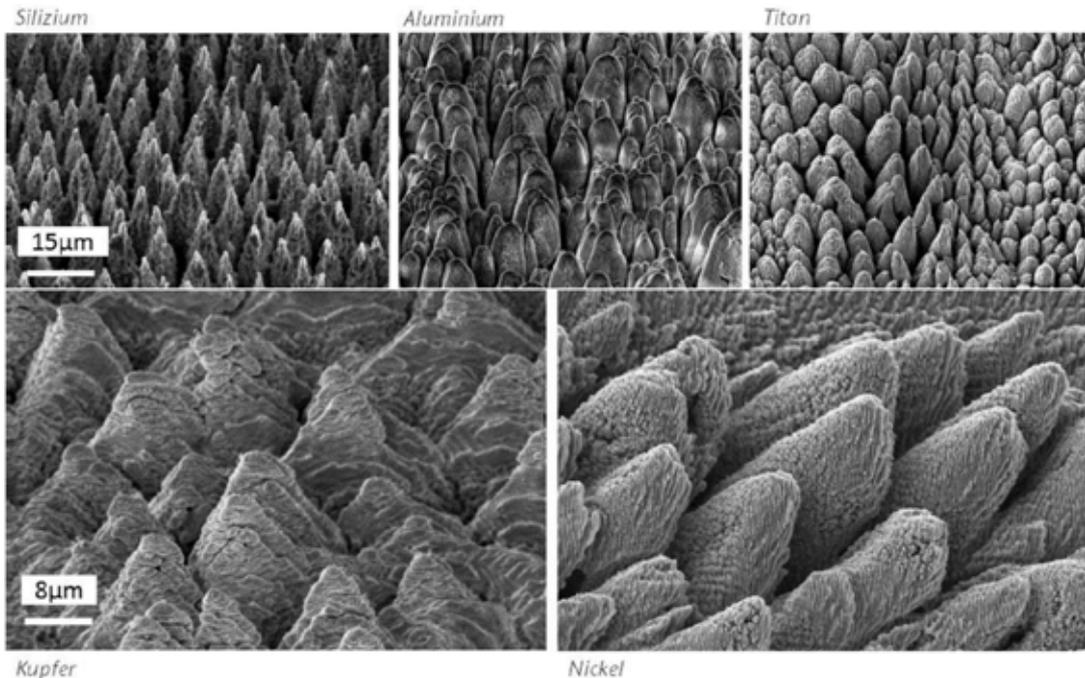


Abbildung 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen verschiedener femtosekundenlaserbearbeiteter Materialien.

Durch Vorgängerprojekte konnte gezeigt werden, dass insbesondere Nickel-Molybdän legierte Elektroden für die Wasserstoffseite und Nickel-Eisen legierte Elektroden für die Sauerstoffseite gute Ergebnisse in diskontinuierlichen dreitägigen Messprogrammen erzielt haben. In BLaserKat soll die Stabilität und Performanz der legierten Elektroden in Langzeitelektrolyseuren für bis zu 2000. Ein weiterer wichtiger Faktor für die Performanz von gasbildenden Elektroden ist deren Hydrophilie bzw. Aerophilie, welche ebenfalls durch den Laserprozess beeinflussbar ist. Dabei werden Entstehungsorte, Ablöseradien sowie die Trajektorien der Gasblasen nach der Ablösung erfasst und verarbeitet. Die Visualisierung der Gasblasenablösung erfolgt mithilfe

einer Hochgeschwindigkeitskamera, während zur Auswertung und Detektion eine auf künstliche Intelligenz basierende Software zum Einsatz kommt. Diese Software steht bereits zur Verfügung, wird aber stetig weiterentwickelt. In Abb. 2 ist ein Ausschnitt einer gasblasenbildenden Elektrode mit Detektionskästen und ein resultierendes Histogramm der Abrissdurchmesser beispielhaft dargestellt. Zur Visualisierung werden verschiedene elektrochemische Zellen angefertigt, die einerseits eine Draufsicht und andererseits die Seitenansicht auf die Elektrode erlauben. Eine Draufsichtszelle ist bereits vorhanden und befindet sich im Testlauf.

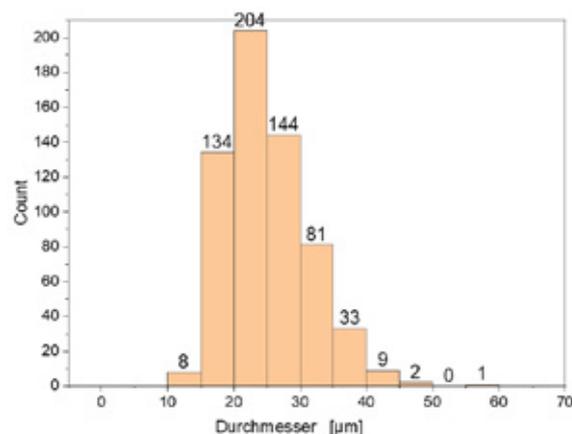
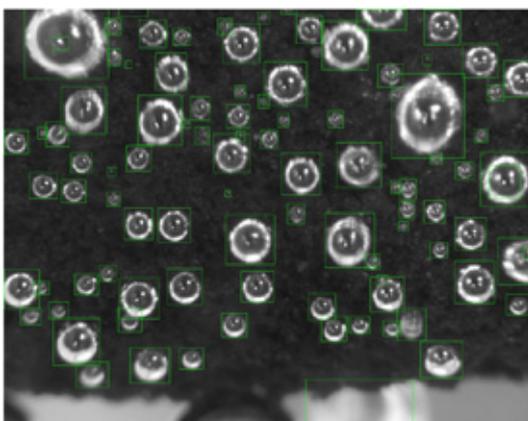


Abbildung 2: Blasenbildung an Elektrode mit Detektionskästen (links) und resultierende Blasendurchmesser-Verteilung (rechts).

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

BLaserKat: Blasenablösecharakteristik und Langzeitstabilität von femtosekundenlaserlegierten Elektrokatalysatoren

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Förderkennzeichen:

GI 1299/1-2

Laufzeit des Vorhabens:

01.07.2023–30.06.2025

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektbearbeiter:

Viktor Hoffmann, M.Sc.



Thomas Gimpel



Viktor Hoffmann

H2-Wegweiser Niedersachsen – Teilprojekt energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen

Kurzfassung

Im Teilprojekt energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen des im Niedersächsischen Vorab vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur und der Volkswagen Stiftung geförderten Innovationslabors „H2-Wegweiser Niedersachsen“ wird der entstehende rechtliche Rahmen für eine Wasserstoffwirtschaft mit den Schwerpunkten der Wasserstoffspeicherung und den rechtlichen Anforderungen an „grünen“ Wasserstoff untersucht. Im Berichtszeitraum wurden zur Wasserstoffspeicherung vor allem Fragen der Entflechtung, also der Zulässigkeit einer vertikalen und horizontalen Integration mit anderen Aktivitäten im Energiebereich, untersucht. Hinsichtlich der Anforderungen an „grünen“ Wasserstoff stand ein delegierter Rechtsakt der EU-Kommission mit detaillierten Regelungen zur Erzeugung von Wasserstoff für den Verkehrssektor im Fokus.

Abstract

As part of the innovation lab project “H2-Wegweiser Niedersachsen”, funded by the Ministry for Science and Art of Lower Saxony with funds from the Volkswagen Foundation, the subpro-

ject analyzes the emerging legal framework for a hydrogen industry. It focuses on both hydrogen storage and the legal requirements for the production of “green” hydrogen. As regards hydrogen storage, during the reporting period predominantly questions regarding the unbundling regime were reviewed. They address the permissibility of vertical and horizontal integration with other activities within the energy sector. Concerning the legal requirements for the production of “green” hydrogen, the EU-Commission’s delegated act inter alia setting out detailed rules for the mobility sector was assessed.

Untersuchungsgegenstand des Projekts „H2-Wegweiser Niedersachsen“



H₂-Wegweiser
Niedersachsen

Das Projekt untersucht in einem interdisziplinären Ansatz Möglichkeiten zur Gestaltung eines wasserstoffbasierten Energiesystems insbesondere für Niedersachsen. Berücksichtigt werden dabei neben verschiedenen technischen Varianten rechtliche, ökonomische und ökologische Einflüsse. Ziel des Projekts ist die Erarbeitung einer ganzheitlichen Methodik zur Konzeption und Bewertung von kombinierbaren Speicher-, Transport-, Konversions- und Nutzungsprozessen für Wasserstoff.

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft geht mit der Schaffung eigener Infrastrukturen (vor allem Elektrolyseure, Wasserstoffnetze und Wasserstoffspeicher) einher, für die ein geeigneter energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen entwickelt werden muss. Das Teilprojekt 5 untersucht diesen entstehenden energiewirtschaftsrechtlichen Rahmen. Dieser findet sich zum einen in einer Übergangsregulierung nach dem deutschen Recht. Erstmals sind mit einer Novelle des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) Ende 2021 Vorschriften für reine Wasserstoffnetze und in begrenztem Umfang für Wasserstoffspeicher in das deutsche Recht

Projektpartner

TU Clausthal:

- Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum (CUTEC)
- Institut für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (IFAD)
- Institute of Subsurface Energy Systems (ITE)
- Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT)
- Institut für Endlagerforschung (IELF)
- Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht (IBER)

Leibniz-Universität Hannover

- Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES-EES)
- Institut für Umweltplanung (IUP)
- Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH)

aufgenommen worden. Zum anderen wird auf europäischer Ebene ein neues Gasbinnenmarktpaket verhandelt, das neben der Erdgaswirtschaft auch die Wasserstoffwirtschaft adressieren soll. Da die Verabschiedung dieser Regelungen längere Zeit in Anspruch nimmt, sah sich der deutsche Gesetzgeber veranlasst, bis zum Inkrafttreten europäischer Rechtsakte einen übergangsweisen rechtlichen Rahmen für die erste Phase des Markthochlaufs einer Wasserstoffwirtschaft zu schaffen. Die Anwendbarkeit dieser Vorschriften beruht auf einem Opt-In-Modell, wobei es Betreibern von Wasserstoffnetzen und -speichern freisteht, sich durch unwiderrufliche Erklärung an die Bundesnetzagentur der Regulierung nach dem EnWG zu unterwerfen. Weitere Voraussetzung ist eine positive Prüfung der Bedarfsgerechtigkeit der Wasserstoffnetze durch die Bundesnetzagentur. Bislang hat kein Betreiber von Wasserstoffnetzen oder -speichern eine Erklärung abgegeben, die zur Anwendung der Übergangsregulierung geführt hat. Das europäische Gasbinnenmarktpaket könnte im Laufe des Jahres 2024 verabschiedet werden. Die EU-Kommission erachtet eine Regulierung von Wasserstoffinfrastrukturen künftig als zwingend erforderlich, um diese kosteneffizient, wettbewerbsorientiert und grenzüberschreitend zu entwickeln, und schlägt eine verpflichtende Regulierung vor. Schwerpunkte der rechtlichen Untersuchung bilden zum einen die – aus niedersächsischer Sicht besonders relevante – Wasserstoffspeicherung und zum anderen mögliche Differenzierungen des rechtlichen Rahmens unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten. Hierzu wurde die regulierungsrelevante Ausgangslage erhoben und mit den Forschungs- und Praxispartnern diskutiert. Mit dem Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft verändern sich auch die Anforderungen an den rechtlichen Rahmen, sodass insbesondere mit den Teilprojekten zur Energiesystemanalyse und zur Entwicklung von Geschäftsmodellen antizipierte Entwicklungen und Entwicklungsschritte abgestimmt wurden. Ferner wurden die Ziele der Wasserstoffstrategien auf Ebene der EU, des Bundes und der norddeutschen Bundesländer berücksichtigt.

Entflechtung der Wasserstoffspeicherung

Betreiber von Wasserstoffnetzen müssen nach deutschem Recht, wenn sie der Regulierung aufgrund einer Opt-In-Erklärung unterfallen, die Unabhängigkeit des Netzbetriebs von der Wasserstoffherzeugung, der Wasserstoffspeiche-

rung sowie vom Wasserstoffvertrieb sicherstellen. Demnach besteht einer Pflicht zur operativen Entflechtung von Wasserstofftransport und Wasserstoffspeicherung, die allerdings gesetzlich nicht näher konkretisiert wird. Zudem dürfen Wasserstoffnetzbetreiber kein Eigentum an Anlagen zur Wasserstoffherzeugung, zur Wasserstoffspeicherung oder zum Wasserstoffvertrieb halten, diese errichten oder betreiben. Für die Wasserstoffspeicherung gibt es keine Entflechtungsvorgaben gegenüber der Wasserstoffherzeugung und dem Wasserstoffvertrieb. Erfolgen Wasserstoffspeicherung und Wasserstofftransport jedoch gemeinsam in einer Gesellschaft, wirken sich die Pflichten zur Entflechtung des Wasserstofftransports mittelbar auf die Wasserstoffspeicherung aus. Für den Betrieb eines Wasserstoffnetzes muss in der Rechnungslegung des Unternehmens ein eigenes Konto geführt werden. Tätigkeiten des Betriebs einer Wasserstoffspeicheranlage dürfen nicht auf diesem Konto gebucht werden.

Die EU-Kommission hat Vorschläge für eine Verordnung und eine Richtlinie über gemeinsame Vorschriften für die Binnenmärkte für erneuerbare Gase und Erdgas sowie Wasserstoff vorgelegt. Die dortigen Vorschläge zur Entflechtung betreffen die Trennung verschiedener Aktivitäten eines Unternehmens innerhalb des Wasserstoffsektors bzw. gegenüber Aktivitäten im Erdgas- und Elektrizitätssektor. Hinsichtlich der genauen Entflechtungsanforderungen ergeben sich teilweise Unklarheiten, die im Projekt näher untersucht wurden.



Abbildung 2: Horizontale Entflechtung der Sektoren Strom, Wasserstoff und Erdgas.

Zunächst erfordert die buchhalterische Entflechtung, dass Betreiber von Wasserstoffspeichern zur Vermeidung von Diskriminierungen, Quersubventionen und Wettbewerbsverzerrungen in ihrer internen Rechnungslegung ein getrenntes Konto für Wasserstoffspeicherung führen.

Zudem müssen Betreiber von Wasserstoffspeicheranlagen zumindest hinsichtlich ihrer Rechtsform, Organisation und Entscheidungsgewalt unabhängig von den übrigen Tätigkei-

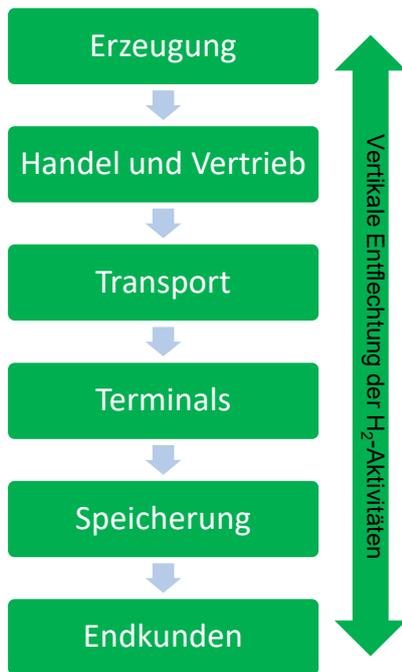


Abbildung 1: Vertikale Entflechtung innerhalb des Wasserstoffsektors.

ten des Unternehmens sein, die nicht mit dem Betrieb einer Fernleitung für Erdgas, der Verteilung, dem Transport oder der Verteilung von Gasen zusammenhängen. Dies verlangt eine rechtliche Entflechtung der Wasserstoffspeicherung im Verhältnis zu Wasserstoffherzeugung und -vertrieb, sowie eine operationelle Entflechtung. Nach den Mindestkriterien des Richtlinienvorschlags ist z.B. sicherzustellen, dass das Leitungspersonal nicht betrieblichen Einrichtungen des integrierten Unternehmens angehört, die direkt oder indirekt für den laufenden Betrieb in den Bereichen Gewinnung, Verteilung oder Versorgung von Gasen zuständig ist. Zudem muss der Betreiber von Wasserstoffspeichereinrichtungen in Bezug auf Vermögenswerte, die für den Betrieb, Wartung und Ausbau erforderlich sind, tatsächliche Entscheidungsbefugnisse innehaben, die unabhängig vom integrierten Unternehmen ausgeübt werden können. Es ist vorgesehen, dass die EU-Kommission die Mindestkriterien durch delegierte Rechtsakte konkretisieren kann.

Eine eigentumsrechtliche Entflechtung ist für die Wasserstoffspeicherung, anders als für den Wasserstofftransport, nicht vorgesehen. Die eigentumsrechtliche Entflechtung verlangt die Trennung des Eigentums am Wasserstoffnetz von einem vertikal integrierten Unternehmen. Wenn Wasserstoffspeicherung und Wasserstofftransport gemeinsam innerhalb eines vertikal integrierten Unternehmens geführt werden sollen, kann sich das Erfordernis der

eigentumsrechtlichen Entflechtung für den Wasserstofftransport aber mittelbar auf die Wasserstoffspeicherung auswirken. Der Wasserstofftransport ist im Verhältnis zur Wasserstoffherzeugung und Wasserstoffvertrieb eigentumsrechtlich zu entflechten. Entsprechende Entflechtungsanforderungen gelten dann auch im Verhältnis der Wasserstoffspeicherung zu Wasserstoffherzeugung und Wasserstoffvertrieb. Dies könnte zur Folge haben, dass der gemeinsame Wasserstofftransport und die Wasserstoffspeicherung in einem vertikal integrierten Unternehmen, das auch in den Bereichen der Wasserstoffherzeugung und des Wasserstoffvertriebs aktiv ist, nicht mehr zulässig wäre. Dies könnte den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft hemmen, da die aufgebauten Infrastrukturen nach 2030 nicht gemeinsam im Unternehmen verbleiben könnten. Alternativ zur eigentumsrechtlichen Entflechtung ist Übergangsweise das sog. ITO-Modell (Independent Transmission System Operator) möglich, das anders als im Strom- und Erdgassektor aber nur befristet bis 2030 zulässig bleibt. Hierbei darf ein vertikal integriertes Unternehmen Eigentümer des Wasserstoffnetzes bleiben, der Betrieb des Wasserstoffnetzes muss jedoch unabhängig von den übrigen Tätigkeiten des Unternehmens organisiert werden. Nach 2030 steht neben einer eigentumsrechtlichen Entflechtung lediglich das sog. ISO-Modell (Independent System Operator) alternativ zur Verfügung. Hierbei darf zwar das vertikal integrierte Unternehmen zivilrechtlicher Eigentümer des Wasserstoffnetzes bleiben, nicht jedoch das Wasserstoffnetz betreiben.

Die Vorschläge werden auf EU-Ebene zurzeit kontrovers diskutiert, es ist möglich, dass sich diesbezüglich noch Änderungen bei den Entflechtungsanforderungen ergeben. Die Vorschläge der EU-Kommission wurden analysiert und mit den Forschungs- und Praxispartnern hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen für Unternehmen und den Markthochlauf von Wasserstoff diskutiert.

Delegierter Rechtsakt zu „grünem“ Wasserstoff im Verkehrssektor

Gemäß der Erneuerbaren-Richtlinie der EU (Richtlinie (EU) 2018/2001, sog. „RED II“) müssen die Mitgliedstaaten bis zum Jahr 2030 einen Anteil erneuerbarer Energien von 14 % am Endenergieverbrauch im Verkehrssektor erreichen. Berücksichtigungsfähig sind auch erneuerbare flüssige oder gasförmige Kraftstoffe nicht biogeo-

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

H2-Wegweiser Niedersachsen – Energie-systemanalyse zur technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Integration, Speicherung und Konversion von Wasserstoff in Niedersachsen
Teilprojekt Energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen

Fördermittelgeber:

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur,
Volkswagenstiftung

Förderkennzeichen:

ZN3770

Projektlaufzeit:

01.05.2021 – 31.08.2024

Berichtszeitraum:

01.01.2022 – 31.12.2023

Verantwortlicher Teilprojektleiter:

Prof. Dr. Harmut Weyer

Projektbearbeiter:

Dipl.-Jur. Thore Iversen



Hartmut Weyer



Thore Iversen

nen Ursprungs (sog. „RFNBO“), zu denen auch Wasserstoff zählt, der (insbesondere im Wege der Elektrolyse) mittels Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde. Zur Konkretisierung hat die EU-Kommission 2023 die delegierte Verordnung (EU) 2023/1184 (im Folgenden „DA“) erlassen. Der DA enthält – erstmalig – detaillierte Vorschriften, unter welchen Voraussetzungen solche RFNBO als vollständig erneuerbar angesehen werden dürfen. Auch wenn die RED II und der DA nicht die Terminologie der sog. Farbenlehre des Wasserstoffs verwenden, regelt der DA dabei unter anderem die Anforderungen an die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff. Der DA gilt jedoch lediglich für den Verkehrssektor und dort nur für die vollständige Anrechnung der RFNBO auf den Anteil erneuerbarer Energie. Teilweise wird aber erwartet, dass entsprechende Anforderungen künftig auch in anderen Sektoren für die Förderung von Wasserstoff gelten könnten. Daher hat die Ausgestaltung des DA erhebliche Auswirkungen auf die entstehende Wasserstoffwirtschaft. Nach dem DA kann Strom, der über eine Direktleitung an eine Anlage zur Erzeugung von erneuerbarem Strom (EE-Anlage) bezogen wird, im vollen Umfang auf die Erneuerbaren-Quote angerechnet werden, wenn die EE-Anlage frühestens 36 Monate vor der RFNBO-Anlage in Betrieb gegangen ist. Der Strombezug über eine Direktleitung kann mit dem Bezug von Strom aus dem Netz kombiniert werden, wenn die jeweiligen Anforderungen der Strombezugsvariante eingehalten werden, zu denen Strom aus dem Netz als vollständig erneuerbar angerechnet werden kann.

Befindet sich die RFNBO-Anlage in einer Stromgebotszone, in der der durchschnittliche Anteil des erneuerbaren Stroms im vorausgegangenen Kalenderjahr 90 % überstieg, gilt dieser Strom als vollständig erneuerbar. Hierbei darf die Erzeugung von RFNBOs eine Höchstzahl an Stunden nicht überschreiten, die im Verhältnis zum Anteil des erneuerbaren Stroms in der Gebotszone festgelegt wird. Eine vollständige Anrechnung von Strom zur Erzeugung von RFNBOs als erneuerbar ist auch möglich, wenn Strom aus EE-Anlagen verbraucht wird, die sonst innerhalb desselben Bilanzkreisabrechnungszeitintervalls wegen eines abwärts gerichteten Redispatches abgeregelt worden wären.

Alternativ ist eine Anrechnung von Strom als vollständig erneuerbar möglich, wenn sich die EE-Anlagen in einer Stromgebotszone befinden, in der die Emissionsintensität von Strom

unter 18 gCO₂eq/MJ liegt. In diesem Fall müssen ein oder mehrere Verträge über den Bezug von erneuerbarem Strom (Power Purchase Agreements, PPA) in einer Menge geschlossen werden, die mindestens der Menge an Strom entspricht, die zur Erzeugung von RFNBOs verbraucht wird. Zudem müssen die Anforderungen an die zeitliche und geografische Korrelation eingehalten werden. Die zeitliche Korrelation wird erfüllt, wenn die RFNBOs innerhalb desselben Kalendermonats erzeugt werden wie der im Rahmen des PPA erzeugte Strom. Ab 2030 wird der Zeitraum auf eine Stunde verkürzt. Die geografische Korrelation wird eingehalten, wenn sich die EE-Anlage in derselben Stromgebotszone befindet wie die RFNBO-Anlage. Oder, wenn die EE-Anlage sich in verbundenen Gebotszonen befinden und der Strompreis im betreffenden Zeitraum auf dem Day-Ahead-Markt höchstens 20 €/MWh bzw. weniger als das 0,36-fache eines Zertifikats für die Emission von einer Tonne Kohlendioxidäquivalenten beträgt, wie in der verbundenen Gebotszone, in der sich die RFNBO-Anlage befindet oder die Stromerzeugung in einer Offshore-Gebotszone erzeugt wird, die mit der Gebotszone verbunden ist, in der sich die RFNBO-Anlage befindet.

Schließlich kann Strom im Rahmen eines PPA über das Netz bezogen werden, wenn die Anforderungen an die zeitliche und geografische Korrelation und die Bedingungen der Zusätzlichkeit erfüllt werden. Das Kriterium der Zusätzlichkeit verlangt, dass die EE-Anlagen frühestens 36 Monate vor der RFNBO-Anlage in Betrieb genommen wurden, es sich also um „neue“ EE-Anlagen handelt. Wird die Kapazität einer EE-Anlage erweitert, wird angenommen, dass die zusätzliche Kapazität gleichzeitig mit der ursprünglichen Anlage in Betrieb genommen wurde, sofern sich die zusätzliche

Kapazität am selben Standort befindet und die Erweiterung spätestens 36 Monate nach Inbetriebnahme der ersten Anlage erfolgt. Zudem dürfen EE-Anlagen, deren Strom von den RFNBO-Anlagen genutzt wird, keine Förderung in Form von Betriebs- oder Investitionsbeihilfen erhalten haben. Ausgenommen sind Förderungen, die vor einem Repowering gezahlt wurden, finanzielle Förderung für Land- oder Netzanschlüsse oder Förderungen, die vollständig zurückgezahlt wurden. Für eine Übergangsfrist bis zum 1. Januar 2038 gelten die Anforderungen der Zusätzlichkeit nicht für EE-Anlagen, die vor dem 1. Januar 2028 in Betrieb genommen werden.

Die Anforderungen an die Anrechenbarkeit von Strom zur Erzeugung von RFNBOs haben direkte Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Erzeugung von RFNBOs. Für die elektrolytische Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff nach den Anforderungen des DA haben die Teilprojekte zum energiewirtschaftsrechtlichen Rahmen und zu den Geschäftsmodellen die rechtlichen Rahmenbedingungen diskutiert und zu einer techno-ökonomischen Analyse der Eigenschaften und Gestehungskosten für „grünen“ Wasserstoff in der EU zusammengeführt. Die Ergebnisse dieser gemeinsamen Untersuchung werden zurzeit zur Veröffentlichung vorbereitet.

Veröffentlichungen

Brandt/Iversen/Eckert/Peterssen/B. Bensmann/A. Bensmann/Beer/Weyer/Hanke-Rauschenbach: Cost and competitiveness of green hydrogen in Europe: Effects of the European Union regulatory framework, (in peer-review).

Projekt SiNED - Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation – Kompetenzbereich wirtschaftliche und energierechtliche Fragen

Kurzfassung

Die Energiewende mit zunehmend dezentraler, volatiler Erzeugung, die Fortentwicklung des europäischen Strombinnenmarkts und Veränderungen in der Verbrauchsstruktur, etwa durch die vermehrte Nutzung von Strom in anderen Sektoren, stellen die Stromnetze vor neue Herausforderungen. Die Einbindung bisher ungenutzter Flexibilitäten, etwa in Form von Speichern oder auch Elektrofahrzeugen, sowie die fortschreitende Digitalisierung der Prozesse können zu einer Entlastung beitragen. Das vom niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderte Forschungsprojekt „SiNED“ erarbeitet auch in der 2022 begonnenen 2. Projektphase Lösungsansätze für den sicheren Betrieb künftiger Stromnetze.

Abstract

The energy transition with the increase in decentralized, volatile power production, the continuing development of the European internal market for electricity and changes in the structure of power use, e.g. because of the increased use of power in other sectors, pose challenges for the electricity grids. The integration of so far unused flexibilities, such as power storages or electric vehicles, as well as the progressive digitalization can facilitate the operation of the grids. The research project “SiNED”, funded by the Lower Saxony Ministry for Science and Culture, continues to develop solutions for the safe operation of future power grids in the second project phase that started in 2022.

Projekthintergrund

Die Energiewende, verstärkte Sektorenkopplung und die Weiterentwicklung der Energieunion führen zu veränderten Stromflüssen. Um dennoch eine kontinuierlich sichere Stromversorgung zu gewährleisten, ist eine Fortentwicklung von Systemdienstleistungen und Engpassmanagement sowie zugehöriger Technologie erforderlich. 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. In der am 01.11.2022 begonnenen zweiten Projektphase werden Fragestellungen aus der ersten Phase fortgeführt und vertieft. Neun Teilprojekte aus drei Kompetenzbereichen befassen sich hierzu mit der koordinierten Bereitstellung von Systemdienstleistungen und Engpassmanagement, Regelungstechnik und Schutzsystemen, dem Umgang mit Prosumern, Speichern und Elektrofahrzeugen, Plattformen zur Erbringung von Systemdienstleistungen, Datenstrukturen und möglichen Angriffsszenarien. Rechtliche Fragestellungen sind Gegen-

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

stand eines Teilprojekts unter der Leitung von Prof. Dr. Hartmut Weyer. Im Berichtszeitraum wurden rechtliche Aspekte der Mehrfachnutzung von Stromspeichern, der Datenverarbeitung im Zusammenhang mit der Erbringung von Engpassmanagement- und Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge sowie des Einsatzes von Lasten sowohl für die Erbringung von Engpassmanagement- als auch Systemdienstleistungen behandelt.

Finanzielle Belastungen bei der Mehrfachnutzung von Stromspeichern zur Erbringung von Engpassmanagement- und Systemdienstleistungen

In einem von der Energiewende geprägten Stromversorgungssystem mit zunehmender volatiler, dezentraler Erzeugung steigt der Bedarf an netzdienlich einsetzbarer Flexibilität. Hierzu können etwa in Haushalten installierte Batteriespeicher beitragen, die große Teile des Tages weder laden noch entladen werden und in diesen Zeiten ohne Komfortverlust für den Betreiber zu netzdienlichen Zwecken eingesetzt werden könnten. Gegenwärtig werden Batteriespeicher allerdings oftmals allein zur Eigenverbrauchsoptimierung eingesetzt. Vor diesem Hintergrund wurde in diesem Arbeitspaket untersucht, inwiefern der gegenwärtige Rechtsrahmen die Nutzung von Speichern für unterschiedliche Einsatzzwecke hemmen könnte, wobei der Schwerpunkt auf den finanziellen Auswirkungen einer Mehrfachnutzung lag.

Der europäische Rechtsrahmen sieht für sog. aktive Kunden, in deren Eigentum sich eine Speicheranlage befindet, das Recht vor, mehrere Dienstleistungen gleichzeitig zu erbringen. Auch der deutsche Rechtsrahmen enthält inzwischen vielfältige Sonderregelungen, um die Nutzung von Stromspeichern zu erleichtern. Die bislang problematische EEG-Umlage ist zum 01.01.2023 vollständig weggefallen. Allerdings können sich in bestimmten Konstellationen weiterhin Doppelbelastungen ergeben, d.h. sowohl die Einspeicherung von Strom als auch die endgültige Nutzung des wieder ausgespeicherten Stroms werden mit Netzentgelten oder staatlich induzierten Strompreisbestandteilen belastet. Hinsichtlich der Netzentgelte schließen verschiedene Sonderregelungen zwar eine Belastung des aus dem Netz eingespeicherten Stroms und damit eine Doppelbelastung aus oder reduzieren diese. Sie lassen sich allerdings teilweise dahingehend verstehen, dass der gesamte wieder ausgespei-

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

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

Fördermittelgeber:

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

Förderkennzeichen:

VWZN3563

Projektlaufzeit:

1. Projektphase
01.11.2019 – 31.10.2022
2. Projektphase
01.11.2022 – 31.10.2024

Berichtszeitraum:

01.01.2022 – 31.12.2023

Projektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

Projektbearbeiterin:

Dipl.-Jur. Alexandra Scheunert



Hartmut Weyer



Alexandra Scheunert

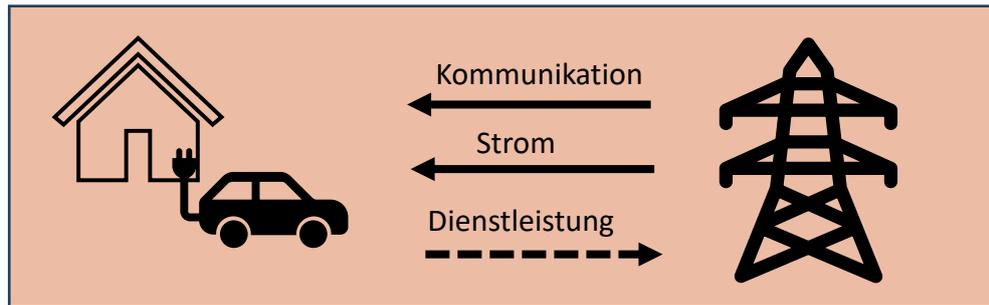


Abbildung 1: Schematische Darstellung Szenario „Basis“.

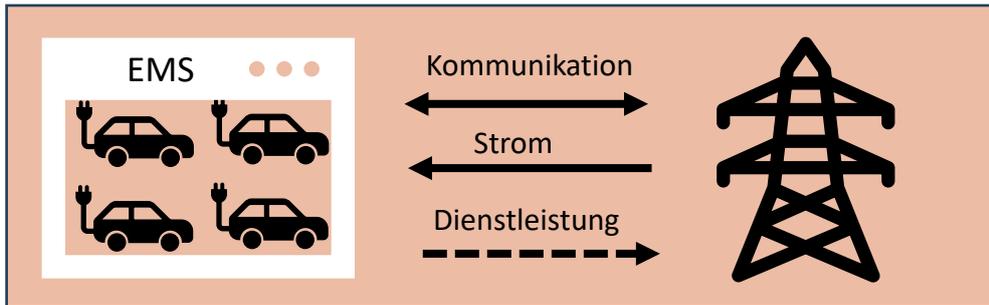


Abbildung 2: Schematische Darstellung Szenario „Flotte“.

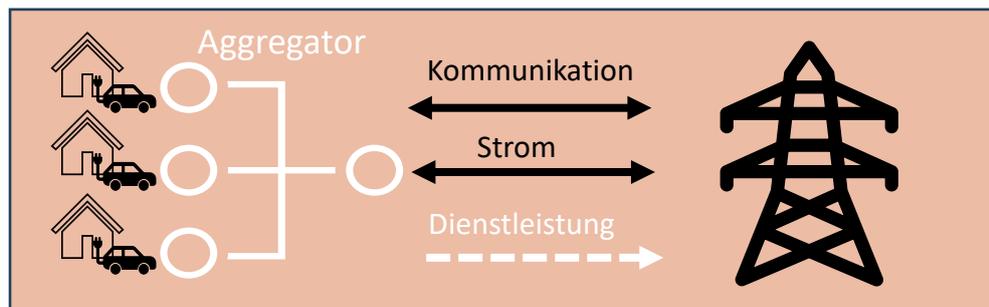


Abbildung 3: Schematische Darstellung Szenario „Aggregator“.

cherte Strom in das Netz zurückgespeist werden muss. Dies würde bei Formen der Mehrfachnutzung, bei denen der ausgespeicherte Strom teilweise nicht in das Netz eingespeist, sondern z.B. für den Eigenverbrauch genutzt wird, zum Verlust der Netzentgeltbefreiung bzw. -reduktion führen. Eine ähnliche Konstellation ergibt sich hinsichtlich der Stromsteuer. Untersucht wurde auch die Rechtslage für weitere Umlagen, nämlich die KWKG-Umlage, die Offshore-Umlage, die § 19 StromNEV-Umlage und die neu eingeführte Wasserstoff-Umlage, sowie für die Konzessionsabgabe.

Hemmnisse für die Mehrfachnutzung von Stromspeichern können sich zudem aus den Auswirkungen auf die EEG-Förderung für Strom aus erneuerbaren Energiequellen ergeben. Das hierfür nach deutschem Recht anwendbare sog. Ausschließlichkeitsprinzip sieht bei strengem Verständnis vor, dass die gesamte zwischengespeicherte Energie ausschließlich aus erneuerbaren Energien oder Grubengas stammen muss. Jedenfalls die simultane Mehr-

fachnutzung, in dem Sinne, dass Energie aus förderfähigen und nicht förderfähigen Energieträgern zeitgleich gespeichert wird, verstößt nach verbreiteter Auffassung gegen das Ausschließlichkeitsprinzip. Eine zeitlich gestaffelte Nutzung zur Speicherung förderfähiger und nicht förderfähiger Energieträger ist demgegenüber grundsätzlich denkbar.

Rechtsrahmen für die Datenverarbeitung bei der Erbringung von Engpassmanagement- und Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge

Auch Elektrofahrzeuge können netzdienlich eingesetzt werden, indem sie Systemdienstleistungen erbringen oder für das Engpassmanagement herangezogen werden. In Betracht kommen sowohl Anpassungen des Ladevorgangs an die jeweilige Netzsituation als auch Rückspeisungen aus den Traktionsbatterien in das Netz („vehicle to grid“). Voraussetzungen sind jeweils genaue Informationen sowohl über das Elektro-

fahrzeug als auch das Netz sowie ggf. über weitere zu berücksichtigende Faktoren.

Untersucht wird insoweit die Frage, inwiefern der Rechtsrahmen die für derartige Dienstleistungen erforderlichen Datenverarbeitungen zulässt. Dazu wurden zunächst auf Basis von Gesprächen mit Netzbetreibern, Energieversorgern und Wissenschaftlern drei Szenarien der Dienstleistungserbringung durch Elektrofahrzeuge entwickelt, die auf unterschiedlich komplexe Datenverarbeitungen angewiesen sind. Auf dieser Basis wird geprüft, inwiefern sich die an der Dienstleistungserbringung beteiligten Parteien als nach dem MsbG zur Verarbeitung personenbezogener Daten berechnigte Stellen einordnen lassen und inwieweit die erforderlichen Datenverarbeitungen zulässig sind bzw. sich ggf. für die Dienstleistungserbringung hinderliche Einschränkungen ergeben.

Rechtsrahmen für die Mehrfachnutzung von Lasten zur Erbringung von Engpassmanagement- und Systemdienstleistungen

Nachdem in der ersten Projektphase untersucht worden war, wie der Rechtsrahmen weiterentwickelt werden könnte, um eine verstärkte Integration von Lasten in das Engpassmanagement zu erreichen, wird in der zweiten Projektphase die Mehrfachnutzung von Lasten zur Erbringung von Flexibilität sowohl für die Zwecke des Engpassmanagements als auch für die Erbringung von Systemdienstleistungen (z.B. Bereitstellung von Regelleistung oder Blindleistung) vertieft. Derzeit findet ein Einsatz von Lasten im Bereich des Engpassmanagements nur im begrenzten Umfang statt. Die zukünftige Bedeutung der Erschließung von Verbrauchersowie Speicheranlagen als zuschaltbare oder abschaltbare Lasten wird mit Blick auf die kommenden Herausforderungen für die Stromnetze zunehmen. Insbesondere das bislang nur in Ansätzen erschlossene Potenzial zuschaltbarer Lasten, welche im Falle eines Abrufs durch den Netzbetreiber ihren Bezug aus dem Stromnetz erhöhen können, ist geeignet, die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromnetze nachhaltig zu unterstützen.

Die Integration von Lasten in das Regime des Engpassmanagement darf hierbei jedoch nicht mit anderen Einsatzzwecken kollidieren, die sich ebenfalls positiv auf die Netz- und Versorgungssicherheit auswirken. So wird die Flexibilität von Lasten bereits heute in Gestalt von Regelre-

serve genutzt und auch die Bereitstellung von Blindleistung ist insbesondere bei einem vermehrten Einsatz von Stromrichtern zukünftig denkbar. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Untersuchung der rechtlichen Vorgaben zum Verhältnis zwischen der Erbringung verschiedener Systemdienstleistungen einerseits und von Engpassmanagement-Dienstleistungen andererseits. Ziel ist es, mögliche Hemmnisse für eine Mehrfachnutzung von Lasten zu identifizieren, um hieran anknüpfend Aussagen über mögliche Verbesserungen des Rechtsrahmens zu treffen. Mögliche Regelungsfelder betreffen z. B. Vorrangregelungen im Falle kollidierender Einsatzzwecke, gemeinsame Vermarktungsplattformen oder Anforderungen an die Netzbetreiberkoordination.

Veröffentlichungen

- [1] Biedermann, C., Beutel, V., Beyrodt, J., Brand, M., Buchholz, S., Gerlach, J., Majumdar, N., Leveringhaus, T., Lotz, M., Raeiszadeh, A., Scheunert, A., Teimourzadeh Baboli, P., Tiemann, P. H., Wegkamp, C., Agert, C., Breitner, M. H., Engel, B., Geissendörfer, S., Hofmann, L., Könnemund, M., Kurat, M., Lehnhoff, S., von Maydell, K., Nieße, A., Weyers, H.: Research Project SiNED Insights – Ancillary Services for Reliable Power Grids in Times of the Progressive German Energiewende and Digital Transformation in: VDE ETG Kongress 2023 – Die Energiewende beschleunigen, Kassel, 25.-26. Mai 2023, VDE Verlag, pp. 905-912. Online verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/proceedings-en/456108132.html>.
- [2] Wegkamp, C., Buchholz, S., Tiemann, P.H., Engel, B., Weyer, H., Nieße, A.: Specific Product Characteristics of System Services and a Discussion of the Joint Market-Based Procurement in a Single Product, International Ruhr Energy Conference, 27.-28. September 2022. Online verfügbar unter: https://www.inrec.wiwi.uni-due.de/fileadmin/fileupload/AG-IREC09/INREC2022/Wegkamp-Specific_Product_Characteristics_of_System_Services_and_a_Discussion_of_the_joint_market-based_a.pdf.
- [3] Wagner, H., Lüdecke, M., Scheunert, A., Wegkamp, C., Engel, B., Weyer, H.: Technical and Legal Analysis of the Grid-Serving Multi-Use of Battery Storage Systems for Prosumers, 22nd Wind & Solar Integration Workshop, Copenhagen, September 26.-28, 2023.

StaR - Stack Revolution

Kurzfassung

Das Projekt „StaR - Stack Revolution“ ist ein vom BMBF im Rahmen des H2Giga-Leitprojektes geförderter Verbund aus Wissenschaft und Industrie mit dem Ziel der Entwicklung eines besonders kostengünstigen Stacks (Zellenstapel) für die alkalische Wasserelektrolyse. Die TU Clausthal spielt dabei eine zentrale Rolle bei der Materialcharakterisierung mit Fokus auf Elektroden- und Separatormaterialien, dem Entwurf und der Validierung neuer Zelldesigns, der Entwicklung eines Streustromvermeidungs- und Kompensationskonzepts, sowie dem Betrieb und der Bewertung der Elektrolysestacks in finaler Zellgröße im 150 kW-Shortstack-Testfeld. Seit Projektbeginn im April 2021 wurden dafür am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) vier neue Testfelder für den Einsatz von Laborzellen sowie das Shortstack-Testfeld aufgebaut und in Betrieb genommen. Aufgrund des hervorragenden Fortschritts und der vielversprechenden Ergebnisse hinsichtlich der Verringerung der Herstellungskosten, der Wettbewerbsfähigkeit und der guten Lastflexibilität hat das BMBF die Fördermittel noch einmal erhöht. Neben der Erweiterung der Anlagentechnik ist es dadurch auch möglich, die Arbeitsgruppen von Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer und Prof. Dr.-Ing. Christine Minke in das StaR-Projekt einzubinden.

Abstract

The project 'StaR - Stack Revolution' is a BMBF-funded collaboration in the framework of the

Projektpartner

- WEW GmbH, Koordination, Dortmund
- Hochschule Rhein-Waal, Kleve
- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Regensburg
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen
- Technische Universität Dortmund, Dortmund

H2Giga flagship project between science and industry with the aim of developing a particularly cost-effective cell stack for alkaline water electrolysis. Clausthal University of Technology has a central role in material characterization focusing on electrode and separator materials, the layout and validation of new cell designs as well as the development of leakage current avoidance and compensation concept. Moreover, the operation and evaluation of electrolysis stacks in their final cell size are carried out in the 150 kW short stack test field.

Since the start of the project in April 2021, four new test fields for the use of laboratory cells, as well as the short stack test field, have been established and put into operation at the Research Center for Energy Storage Technologies (EST). Due to the excellent progress and promising results regarding the reduction of manufacturing costs, competitiveness, and good load flexibility, the BMBF has increased the funding once again. This allows for the expansion of the test facility technology and the inclusion of the research groups led by Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer and Prof. Dr.-Ing. Christine Minke in the StaR-project.

Verbundprojekt StaR im Rahmen der Technologieplattform H2Giga

Die Nationale Wasserstoffstrategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) initiierte im Jahr 2020 einen Förderaufruf in Höhe von 700 Millionen Euro, der drei Leitprojekte einschloss. Ein Leitprojekt, die Technologieplattform „H2Giga“, wird durch die Dechema koordiniert. Ziel von H2Giga ist die Schaffung grundlegender Erkenntnisse und Fortschritte zur automatisierten Serienfertigung von Wasserelektrolyseuren bis in den Gigawatt-Bereich, mit Fokus auf Fortschritte in Lebensdauer und Kostenreduktion. Die Beteiligung von über 100 Partnern aus Industrie, Wissenschaft und Verbänden unterstreicht die weitreichende Bedeutung dieses Projekts.

Die Elektrolyse-Stacks bilden das Herzstück jeder Wasserelektrolyseanlage, da in ihnen die

Umwandlung elektrischer Energie in den Energieträger Wasserstoff stattfindet. Das Projekt StaR unter der Koordination des Start-Ups WEW aus Dortmund zielt nun auf die Entwicklung eines revolutionären Stack-Designs ab, welches kostengünstige Materialien und hochautomatisierte Fertigungsverfahren integriert und für das zum Ende des Projekts ein Konzept für eine „Gigafactory“ vorliegen soll. Dabei erfordert die Serienproduktion des Stacks präzise Verbindungen fragiler Materialien und steht somit im Fokus einer komplexen Problemstellung, welche innerhalb des interdisziplinären Projektteams ganzheitlich betrachtet wird. Das Projektteam wird dabei aus der Technischen Universität Clausthal, der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, der Ostbayerische Technischen Hochschule Regensburg, der Hochschule Rhein-Waal, der Technischen Universität Dortmund und der WEW GmbH gebildet. Die Projektdauer erstreckt sich über vier Jahre.

Projektstand

Die TU Clausthal ist als zentraler Partner zur experimentellen Bewertung in das StaR-Projekt eingebunden. Seit Projektbeginn im April 2021 wurde das 150 kW-Shortstack-Testfeld erfolgreich in Betrieb genommen und im Oktober 2022 offiziell eröffnet (Abbildung 1). Die realitätsnahen Untersuchungen der von der WEW gelieferten Stacks bei Drücken bis zu 1,5 bar(a), Temperaturen bis zu 90 °C und bei einer maximalen Stackleistung von 150 kW zeigten sehr

gute Ergebnisse. Das neu entwickelte Stackdesign präsentiert sich vielversprechend, indem es niedrige Herstellkosten mit wettbewerbsfähigem Wirkungsgrad und guter Lastflexibilität kombiniert. Durch ein neues, vereinfachtes Steuerungskonzept ist es zudem mit dem entwickelten Stack möglich, die Füllstände der Elektrolyttanks im getrennten Betrieb der Elektrolytkreisläufe in den beiden Halbzellen konstant zu halten und damit stabile Betriebsbedingungen mit kostensenkenden Systemanforderungen zu gewährleisten (Abbildung 2). Weitere Optimierungspotentiale sind Gegenstand laufender Untersuchungen. Aufgrund des sehr guten Projektfortschritts erfolgte eine Fördermittelerhöhung durch das BMBF um gut eine Million Euro, wodurch das Gesamtvolumen der TU

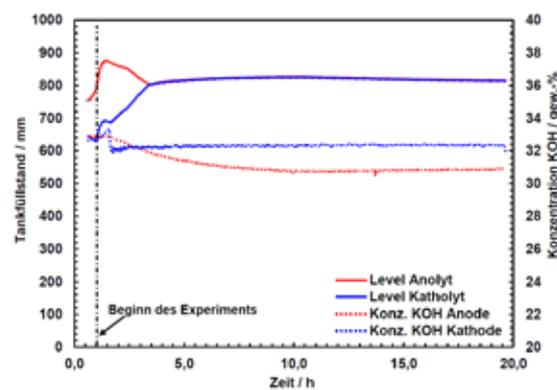


Abbildung 2: Tankfüllstände und KOH-Konzentration des alkalischen Wasserelektrolysestacks im getrennten Betrieb des Shortstacktestfeld mit einem innovativen Steuerungskonzept in Abhängigkeit von der Zeit.



Abbildung 1: Das Shortstacktestfeld erlaubt die experimentelle Bewertung der Wasserelektrolysestacks mit Leistungen von bis zu 150 kW (© die drehen, www.diedrehen.de).



Abbildung 3: Im Rahmen des StaR-Projekts in Betrieb genommene Testfelder für Laborzellen unterschiedlicher Zellfläche. Links: Teststand zur Charakterisierung von Drahtmaterialien und Elektrodenmaterialien mit einer aktiven Fläche bis 3 cm^2 . Rechts: Teststand zur Bewertung der Zelldesigns und Materialien mit einer aktiven Fläche bis 100 cm^2 .

Clausthal-Förderung im Rahmen des StaR-Projekts nun über sechs Millionen Euro beträgt. Diese Mittel sollen vorwiegend zur Erweiterung der Anlagentechnik, insbesondere zur Optimierung der anlagenseitigen Analytik und zur Integration einer Kompressionseinheit genutzt werden. Die Einbindung weiterer Arbeitsgruppen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer und Prof. Dr.-Ing. Christine Minke trägt zur Untersuchung eines netzoptimierten Anlagenbetriebs und zur ökologischen Bewertung der Stacks mittels Life Cycle Assessment (LCA) bei.

Neben dem realitätsnahen Shortstack-Testfeld wurden vier neue Testfelder für den Einsatz von Laborzellen unterschiedlicher Zellfläche konzipiert und aufgebaut. Nach und nach werden diese nun in Betrieb genommen (Abbildung 3). Sie ermöglichen die Charakterisierung des Elektrodenmaterials von einzelnen Drähten

über Gitterstrukturen bis hin zu neuen Zelldesigns. Zudem können die Testfelder zur Untersuchung von Separatormaterialien genutzt werden. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung des Einflusses von Streuströmen auf die alkalische Wasserelektrolyse und die Entwicklung von möglichen Vermeidungsstrategien. Hierzu wurde bereits ein Modell zur Beschreibung von Streuströmen und Potentialverteilungen in einem Elektrolysestack aufgestellt. Dies soll nun erweitert und durch Experimente validiert werden. Anschließend sollen unter Einsatz der Laborzellen Streustromvermeidungs- und -kompensationsmaßnahmen experimentell beurteilt werden. Dies soll zur Optimierung des Streustromkonzepts in der industriellen alkalischen Wasserelektrolyse dienen.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

StaR-Stack Revolution

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Bildung
und Forschung

Förderkennzeichen:

03HY102B

Laufzeit:

01.04.2021 – 31.03.2025

Projektleiter:

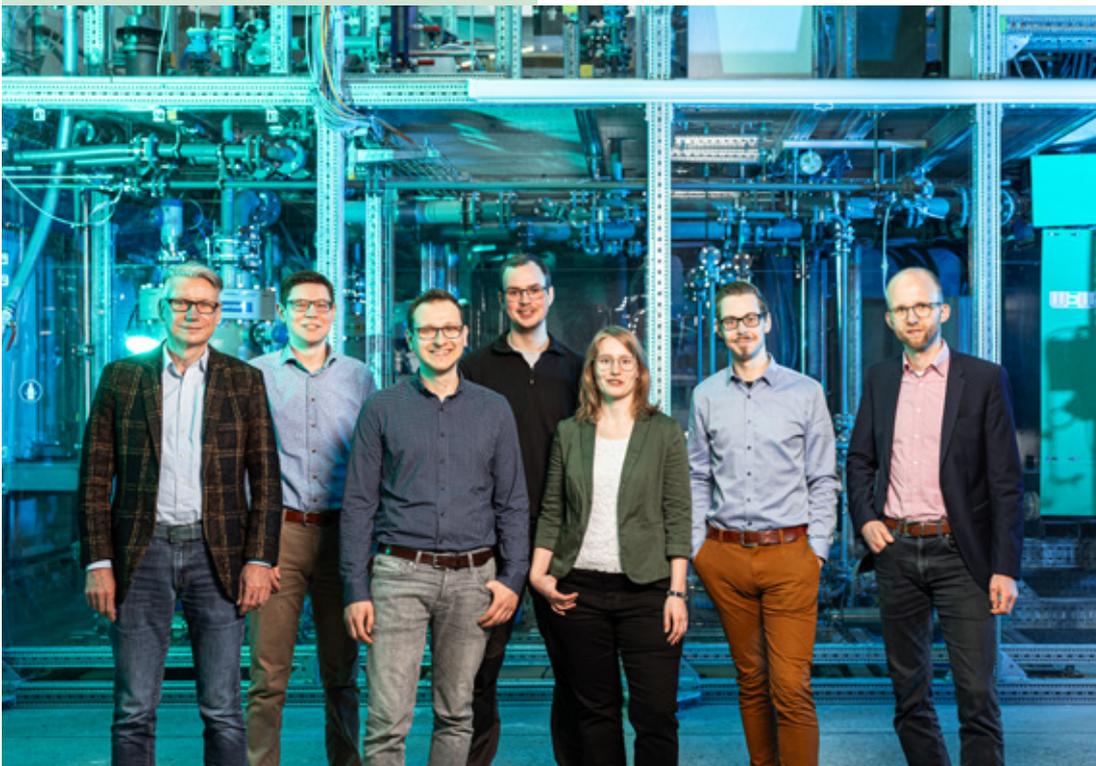
Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek
Dr.-Ing. Maik Becker

Teilprojektleiter:innen:

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Prof. Dr.-Ing. Christine Minke

Projektbearbeiter:innen:

Simon Appelhaus, M.Sc.
Dr. rer. nat. Stina Bauer
Felix Gäde, M.Sc.
Annika Hoppe, M.Sc.
Boris Dorian Pouomegne Kamtoh, M.Sc.
Aaron Rehmer
Oliver Zielinski, M.Sc



MacGhyver: Mikrofluidische Abwasserbehandlung und Erzeugung von grünem Wasserstoff durch elektrochemische Reaktionen

Kurzfassung

MacGhyver, kurz für Microfluidic Wastewater Treatment and Creation of Green Hydrogen via Electrochemical Reactions, ist ein Wegweiser-Projekt des Europäischen Innovationsrates (EIC), das sich mit neuen Wegen für die Produktion von grünem Wasserstoff befasst. Das Herzstück des Systems ist ein mikrofluidischer Elektrolyse-Stack, bei dem unter Einsatz von Abwasser an Elektroden aus unkritischen Rohstoffen grüner Wasserstoff produziert werden soll. Ziel ist es, Wasserstoff mit hoher Effizienz zu erzeugen und gleichzeitig Abwasser von kritischen organischen Verunreinigungen zu befreien. Abgerundet wird der Ansatz durch die Entwicklung und Einbindung einer elektrochemischen Wasserstoffkompression, bei der in einer einzigen Stufe Wasserstoff auf mehrere hundert Bar komprimiert werden soll. In Zusammenarbeit mit EdenTech (Frankreich), der Technischen Universität Poznan (Polen), der Universität Castilla-La Mancha (Spanien), der Technischen Universität Delft (Niederlande) und der Leibniz Universität Hannover soll ein entsprechendes Elektro-

lyseur-Design, einschließlich der Entwicklung und Charakterisierung nachhaltiger Elektroden, erreicht werden. Zum Ende des Projekts soll ein Demonstrator-System im kW-Bereich am EST in Goslar aufgebaut werden.

Abstract

MacGhyver, short for Microfluidic Wastewater Treatment and Creation of Green Hydrogen via Electrochemical Reactions, is a European Innovation Council (EIC) pathfinder project, encountering a novel route for green hydrogen production. The heart of the system to be developed is a microfluidic electrolyzer stack that converts wastewater to green hydrogen at non-critical raw material (non-CRM) electrodes. At the same time, wastewater treatment and electrochemical hydrogen compression are included in the overall device. In collaboration with EdenTech (France), Poznan University of Technology (Poland), University of Castilla-La Mancha (Spain), Delft University of Technology (Netherlands) and Leibniz University Hanover (Germany), an appropriate electrolyzer design including sustainable electrodes needs to be developed. Finally, a kw-class demonstrator system is planned to be installed at the location of the EST in Goslar in 2026.

Projektpartner

- EdenTech (Frankreich)
- Delft University of Technology (Niederlande)
- Poznan University of Technology (Polen)
- Gottfried Wilhelm Leibniz Universität (Deutschland)
- University of Castilla-La Mancha (Spanien)

Projektbeschreibung/Projektziele

Das Projekt MacGhyver zielt darauf ab, ein innovatives und kostengünstiges Wasserstoffproduktionssystem in Kombination mit einer fortschrittlichen Abwasseraufbereitung zu ent-



Abbildung 1: MacGhyver-Arbeitsplan zur Entwicklung eines kompakten, hoch-effizienten H₂-Produktionssystems aus Abwasser.

wickeln, welches den Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level TRL) 4 der EU erreicht, also eine im Labor validierte Technologie darstellt.

Um dieses Ziel zu erreichen, sollen im MacGhyver-Projekt mehrere technologische Neuerungen angewendet werden: ein mikrofluidischer Zellstapel (Stack), Elektroden aus unkritischen Rohstoffen (non-CRM), ein elektrochemischer Wasserstoffverdichter und Abwasser als Ausgangsmaterial. Der mikrofluidische Stack soll im Vergleich zu herkömmlichen Elektrolyseuren eine überlegene Leistung in Bezug auf Design, Energieeffizienz und Kompaktheit bieten. So ermöglicht der Einsatz einer Vielzahl an parallel ausgerichteten Mikrokanälen in der mikrofluidischen Zelle die Verarbeitung großer Wasservolumina bei vernachlässigbaren Pumpverlusten. Auf Grund der Abwesenheit von Turbulenzen im Mikromaßstab können die gasförmigen und flüssigen Produkte durch die Nutzung der Strömung voneinander getrennt werden und die Notwendigkeit eines Separators entfällt. Zudem können die Elektroden so in einem sehr geringen Abstand angeordnet werden, was zu vernachlässigbaren ohmschen Verlusten auf der Mikroskala und damit höheren Wirkungsgraden führt. Durch dieses kompakte und effiziente Design wird auch die Verwendung von Abwasser ermöglicht, in einem ersten Schritt wird das Elektrolysesystem jedoch mit einem klassischen alkalischen Elektrolyten betrieben. Nach erfolgreicher Demonstration des alkalischen Elektrolysebetriebs werden geeignete Abwasserströme synthetisch erzeugt und ebenfalls in Laboraufbauten sowie dem Demonstrator eingesetzt.

Im MacGhyver Projekt ist TU Clausthal für die Entwicklung und Charakterisierung der Elektroden für mikrofluidische Wasserelektrolyseure und für die elektrochemische Wasserstoffkompression, sowie für die Identifizierung geeigneter Abwasserquellen und die Charakterisierung von Elektroden in synthetischer Abwasserumgebung verantwortlich.

Die erfolgreiche Entwicklung dieser neuartigen Elektrolysetechnologie hat das Potenzial, den Bereich der grünen Wasserstoffherzeugung zu revolutionieren und den Weg für eine nachhaltigere und kostengünstigere Energiezukunft zu ebnen. Durch die Nutzung des Fachwissens der einzelnen Konsortialpartner und die Nutzung ihrer sich ergänzenden Fähigkeiten ist das MacGhyver-Konsortium in der Lage, die Energielandschaft der Zukunft maßgeblich zu beeinflussen.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

MacGhyver: Microfluidic Wastewater Treatment and Creation of Green Hydrogen via Electrochemical Reactions

Fördermittelgeber:

European Innovation Council (EIC)

Förderkennzeichen:

101069981 (the European Union's Horizon Europe Research and Innovation Program)

Laufzeit

01.09.2022 – 31.08.2026

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek

Projektbearbeiter:

Dr.-Ing. Maik Becker
Lydia Weseler, M.Sc.
Dr. Aleksandra Gladkova

Projektkoordinator:

EdenTech (Frankreich)



Thomas Turek



Maik Becker



Aleksandra Gladkova



Lydia Weseler





WISSENSTRANSFER IN DIE PRAXIS

4.

Transferaktivitäten im Bereich Batteriesicherheit

Auf Anfrage der Polizeiakademie Niedersachsen führte Dr.-Ing. Ralf Bengler am 20.09.2023 im Rahmen des Seminars „Naturwissenschaftliche Grundlagen der Brandursachenermittlung“ Ermittlungsführer:innen in die Grundlagen und Gefährdungspotentiale von PV-Anlagen und Batteriespeichern ein. Neben Anlagenkonzepten und Fehlerursachen von PV-Anlagen mit oder ohne Batteriespeicher standen die unterschiedlichen am Markt verfügbaren Batterietypen und deren spezifischen Fehlerfälle auf dem Programm. Aufgrund der fortschreitenden technologischen Entwicklung werden Batterien

heutzutage nicht mehr nur in Verbindung mit PV-Anlagen genutzt, sondern haben in nahezu jeder alltäglichen Anwendung Einzug gehalten, wie z.B. bei Pedelecs oder Elektrowerkzeugen. Die dabei verwendeten Batterien sind jedoch teilweise von schlechter Qualität und werden stellenweise auch missbräuchlich verwendet oder gar manipuliert. Von daher wurden in der Weiterbildungsveranstaltung auch aktuelle Erkenntnisse zur wirksamen Sicherheits- und Vorsichtsmaßnahmen nach einer technischen Störung vorgestellt.



Am 27.10.2023 besuchte der Fachausschuss „Einsatz, Umwelt, Katastrophenschutz“ des Landesfeuerwehrverbandes Niedersachsen das EST, um sich über die aktuelle Forschung vor Ort zu informieren, insbesondere zu Gefährdungspotentialen von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) und deren Abwehr. Unter Führung des Ortsbrandmeisters der Freiwilligen Feuer-

wehr (FF) Goslar, Udo Löprich, stellte Dr.-Ing. Ralf Bengler den z.T. hochrangigen Gästen das Forschungszentrum und dessen Forschungsschwerpunkte vor. Anhand exemplarischer Beispiele machte Dr. Bengler die Herausforderung durch den Einsatz von LIB deutlich, die u.a. zu einer gemeinsamen Projektinitiative des EST mit der FF Goslar und einer diesbezüglichen äußerst spannenden Diskussion der Teilnehmenden geführt hat. Den Abschluss der Veranstaltung bildete ein gemeinsamer Rundgang durch die Energiespeicherlabore sowie zur Technikumsanlage zur alkalischen Wasserelektrolyse. In diesem Kontext wies Dr. Bengler auf die zentrale Rolle von Batterien und Wasserstoff bei der Gestaltung der Energiewende hin, die über ähnliche Gefährdungspotentiale verfügen.



Regionaler Wissenstransfer: Das Unternehmergegespräch ENERGIE

Seit dem Jahr 2011 veranstalten die Energie Ressourcen Agentur (ERA) Goslar und die Wirtschaftsförderung Region Goslar (WiReGo), mit Unterstützung der Wirtschaftsförderung der Stadt Goslar, die Reihe "Unternehmergegespräch ENERGIE". Das Forschungszentrum Energiespeichertechnologie (EST) der TU Clausthal tritt seit dem Jahr 2020 als Mitveranstalter auf. Die Reihe hat sich in den vergangenen Jahren als bedeutende Informations- und Austauschplattform für Akteur:innen aus Unternehmen, Kommunen, Forschung und Zivilgesellschaft in der Region etabliert. Ziel ist es, stets neueste Informationen zur ressourcenschonenden und wirtschaftlichen Nutzung von Energieträgern zu liefern, über Fördermöglichkeiten zu informieren und den fachlichen Austausch in der Region zu stärken.

Neben regionaler und überregionaler Expertise und praktischen Erfahrungen von Fachleuten aus Unternehmen, Wirtschaftsförderung, Verwaltung, Fachagenturen und Beratungsunternehmen etc. fließen in die Veranstaltungen stets auch aktuelle und praxisrelevante Ergebnisse aus der wissenschaftlichen Forschung ein. Für das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien stellt die Beteiligung an dieser Veranstaltung einen wichtigen Baustein der Aktivitäten im Bereich des regionalen Wissens- und Technologietransfers dar. In idealer und niedrigschwelliger Weise werden aktuelle Forschungsergebnisse in das regionale Innovationssystem kommuniziert und parallel auch unmittelbare praxisrelevante Forschungsbedarfe aufgegriffen.



Im Berichtszeitraum 2022 und 2023 haben die genannten drei Kooperationspartner insgesamt acht Unternehmergegespräche organisiert und durchgeführt. Das Portfolio der Themen umfasste dabei u.a. die Diskussion von Potenzialen der Geothermie und der Wasserstofftechnologie zur Sicherung der Energieversorgung, dem Einsatz alternativer Energieträger im Mobilitätsbereich sowie Maßnahmen zur Energiekostensenkung und zum Erreichen der Klimaneutralität in Unternehmen.

H2Goslar – das Wasserstoffnetzwerk im Landkreis Goslar

H2GOSLAR

Das Wasserstoffnetzwerk
im Landkreis Goslar

Auf gemeinsame Initiative von Landkreis und Stadt Goslar konnte im Jahr 2023 das regionale Wasserstoffnetzwerk „H2Goslar“ mit Hilfe der Wirtschaftsförderung Region Goslar GmbH & Co. KG aus der Taufe gehoben werden. Mit dem Ziel, im Landkreis Goslar eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft zu entwickeln, bündelt das Netzwerk die regionalen Kompetenzen aus Wissenschaft, Wirtschaft sowie Politik und Verwaltung. Mit Blick auf die Ziele der Energiewende und des Klimaschutzes sowie für eine langfristige Sicherung des hiesigen Industriestandorts ist der Ausbau dieses Energieträgers von größter Bedeutung. Gerade im Landkreis Goslar, einem der größten Chemiestandorte Niedersachsens, ist eine verlässliche, klimaschonende und wirtschaftliche Versorgung mit Energie ein wesentlicher Standortfaktor.

Nach dem Kickoff-Meeting im Frühjahr 2023 im Kreishaus und der Vorstellung erster Projektideen im Sommer 2023 im Batterie- und Sensoriktestzentrum auf dem EnergieCampus Goslar sind nun bereits erste konkrete Aktivitäten des neuen Netzwerks angelaufen. So wurden in Zusammenarbeit mit 30 Expert:innen und mit Unterstützung der Energie Ressourcen Agentur Goslar, dem Klimaschutzmanagement des Landkreises Goslar, dem Forschungszentrum Energiespeichertechnologien sowie dem Verein Erneuerbare Energie-Szenarien e. V. für den Landkreis Goslar Energieszenarien zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2045 entwickelt und der interessierten Öffentlichkeit vorgestellt. In diesem Zuge wurden mögliche Projekte und Umsetzungsmöglichkeiten diskutiert. Hierzu zählt u.a. auch der Aufbau eines Reallabors zur Sektorenkopplung, welches unter maßgeblicher Beteiligung von Arbeitsgruppen des EST und weiterer Einrichtungen der TU Clausthal sowie weiteren Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft aufgebaut werden soll.





Teilnehmer:innen der Gründungsveranstaltung im Frühjahr Kreishaus.

Teilnehmer:innen des Workshops im Sommer auf dem Energiecampus. © WiReGo







SCHLAGLICHTER

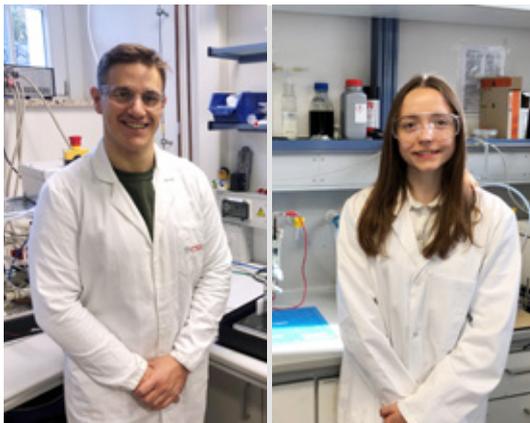
5.



Finanzminister Hilbers zu Gast an der TU Clausthal

07.07.2022

Im Zuge seiner Sommerreise hat Niedersachsens Finanzminister Reinhold Hilbers das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal und die restaurierte Aula Academica besucht. Im Zentrum seiner Reise standen innovative Vorhaben des Landes, aber auch Unternehmen in Südniedersachsen.



Spanische Doktorand:innen arbeiten mit der TU Clausthal auf dem Gebiet der elektrochemischen Technologie zusammen

10.11.2022

Das Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik (ICVT) und das Forschungszentrum für Energiespeichertechnologien (EST) haben zwei Doktorand:innen aus Spanien zu einem Trainingsaufenthalt auf dem Energie Campus Goslar empfangen.



Humboldtianer diskutierten über das Thema Circular Economy

22.11.2022

Die Jahrestagung 2022 der Deutschen Gesellschaft der Humboldtianer e.V. (DGH) hat im November in Clausthal und Goslar stattgefunden.



TU Clausthal auf der Hannover Messe

17.04.2023

Forschende der Harzer Universität zeigen innovative Ansätze auf dem Zukunftsfeld der Wasserstofftechnologien. Auch in die „WomenPower2023“ bringt sich die Universität ein.



Zukunftstag auf dem EnergieCampus

04.05.2023

Auch in diesem Jahr haben das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal, das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut und die Energie Ressourcen Agentur Goslar Schülerinnen und Schüler Einblicke in den Forschungsalltag gegeben.



Großer Erfolg für Clausthaler Wasserstoff-Forschung

03.07.2023

Das Bundesforschungsministerium stockt die Förderung am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien um eine Million Euro auf.



Clausthaler Energie- forschung im Fokus

22.09.2023

Transfermagazin der Niedersächsischen Hochschulen nimmt Clausthaler Energieforschung besonders in den Blick.



Studie sieht Potenziale für regenerative Kombi- kraftwerke

22.09.2023

Das Projekt „Energie- und Wasserspeicher Harz“ (EWAZ) über die Kopplung nachhaltiger Systemleistungen zu Energiespeicherung, Hochwasserschutz und Ressourcensicherung ist abgeschlossen.



Schulgruppe aus Bad Harzburg zu Besuch am EST

15.12.2023

Das Fachseminar Energie des Werner-von-Siemens-Gymnasiums aus Bad Harzburg hat am 12.12.2023 das EST in Goslar besucht.



MdB Karoline Otte besucht die Energie Ressourcen Agentur Goslar (ERA) und das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) in Goslar.
© ERA – Energie Ressourcen Agentur Goslar



Vortrag von Dr. Thomas Gimpel auf dem Elektroseminar des Niedersächsischen Landesamtes für Bau und Liegenschaften mit anschließender Exkursion zum Kraftwerk Herrenhausen der enercity AG in Hannover.





ANHANG

6.

EST-Publikationen 2022

Buch

- BECK, Hans-Peter und Jens ZUM HINGST (Hrsg.), 2023. Energie und Wasserspeicher Harz - Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen zur Energiespeicherung, zum Hochwasserschutz und zur Ressourcensicherung (EWAZ: Abschlussbericht : Laufzeit des Verbundprojektes 01.07.2019 bis zum 30.09.2022. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen. ISBN 978-3-7369-7875-1.
- OBERLAND, Alexander, Marcel THIELE und Antonio NEDJALKOV, 2022. Modulare Hochleistungsbatteriesysteme in Verbindung mit Schnellladetechnik (MoBat): Abschlussbericht : Laufzeit des Verbundprojektes 01.11.2016 bis 31.07.2020. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen. ISBN 978-3-7369-7657-3.
- VDI-GESELLSCHAFT ENERGIE UND UMWELT (Hrsg.), 2022. Energiespeicher: ökonomischer, ökologischer und systemischer Wert von netzgekoppelten Energiespeichern. VDI-Statusreport Mai 2022 [online]. Düsseldorf: VDI. Blaue Papiere. ISBN 978-3-949971-04-4. Verfügbar unter: <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/oekonomischer-oekologischer-und-systemischer-wert-von-netzgekoppelten-energiespeichern>

Buchteil

- WEYER, Hartmut, 2022a. Elektrizitätsübertragungs- und Elektrizitätsverteilernetze. In: Michael RODI (Hrsg.), Handbuch Klimaschutzrecht. 1. Auflage. München: C.H.BECK. S. XXXIV, 897 S. ISBN 978-3-406-76789-0.
- WEYER, Hartmut, 2022b. Kommentierung zu §§ 76, 77 MsbG. In: SÄCKER (Hrsg.), Berliner Kommentar zum Energierecht. 5., völlig neu bearbeitete und wesentlich erweiterte Auflage. 2022. Frankfurt a. M.: Deutscher Fachverlag GmbH, Fachmedien Recht und Wirtschaft. S. 17100 S. ISBN 978-3-8005-1779-4

Dissertation

- WERTHER, Benjamin, 2022. Stabilitätsanalyse zur Bereitstellung von Momentanreserve am frequenz-starren Übertragungsnetz durch einen mittelspannungsnetzseitigen Verbund virtueller Synchronmaschinen. Göttingen: Technische Universität Clausthal.
- XIONG, Ying, 2022. Reactive transport modeling of fluid-rock interactions associated with carbonate diagenesis and implications for reservoir quality prediction. Göttingen: Technische Universität Clausthal.

Studentische Abschlussarbeiten

- AYAYDA, Mohammad, 2022. Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Wasserstoff-BHKWs für die Energieversorgung am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien. 26 Januar 2022.
- BARTELS, Hendrik, 2022. Simulation eines hybriden Antriebssystems aus PEM-Brennstoffzelle und Lithium-Ionen-Batterie unter Berücksichtigung der Abwärmenutzung zur Reichweitenverlängerung eines Elektrofahrzeugs im Winter. 31 August 2022.
- CHEN, Yajing, 2022. Life cycle assessment and life cycle costing of an alkaline water electrolysis plant. 2022.
- DINC, Ege Hakki, 2022. Steuerung der Benetzbarkeit von Edelstahloberflächen mittels Femtosekunden-Laserfunktionalisierung. 2022.
- FLOHR, Daniel, 2022. Treibhausgasminderung durch große Batteriespeicher. 16 Dezember 2022.
- HÄRTL, Benjamin, 2022. Produktverantwortung und zirkuläre Geschäftsmodelle für Batteriespeicher in Deutschland. 2022
- HASSLACHER, Sarah, 2022. LCA of the SOEC-based High-Temperature Electrolyser focusing on End-of-Life scenarios,. 2022
- HUSSAIN, Adeel, 2022. Practical risk assessment of harmful gases released during thermal runaway of lithium-ion batteries. 18 Februar 2022.
- KELLER, Jens, 2022. Messaufbau zur Untersuchung von Wasserstoff-Transportprozessen in planaren dünnen Schichten bei hohen Temperaturen. 2022.

- KRUSE, Ulrike, 2022. Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Restkapazität von Heimspeichersystemen anhand von Betriebsdaten. 22 April 2022.
- LIESENHOFF, Fabian, 2022. Optimierung der Betriebsführung stationärer Batteriespeicher zum systemdienlichen Einsatz im Rahmen des Regenerative-Energien-Modell (REMod) zur Transformtion des deutschen Energiesystems. 12 Januar 2022.
- PETERS, Henrik, 2022. Sicherheitsbetrachtungen und Brandbekämpfung im Falle havariierter Lithium-Ionen-Energiespeicher. 27 April 2022.
- REICHRATH, Timo, 2022. Machbarkeitsstudie zur direkten Gasdruckmessung in Lithium-Ionen-Batterien. 10 Januar 2022.
- WACKER, Mary-Jane, 2022. Möglichkeiten der Materialanalyse zur Charakterisierung von internen Fehlerzuständen von Lithium-Ionen-Batterien. 14 März 2022.
- CHUPRYN, Anton, Sebastian HELM, Ines HAUER und Ralf BENGER, 2022. Impact of Battery Energy Storage Systems with Power Electronic Interface at the Grid Connection Point. In: 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) [online]. Kharkiv, Ukraine: IEEE. 3 Oktober 2022. S. 1–5. [Zugriff am: 3 Juli 2023]. ISBN 9798350399202. Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9916409/>.
- FISCHER, Lars Henry, Torben LEMMERMANN, Luis Fernando ARENAS und Ulrich KUNZ, 2022. Development of a scalable test platform for organic and semi-organic flow batteries. In: Nordic Flow Battery Network Winterschool. Technical University of Denmark, Copenhagen. Dezember 2022.
- GERHARDT-MÖRSDORF, Janis und Christine MINKE, 2022. Exergy Based Life Cycle Assessment of Power-to-X and Carbon Capture and Utilization Applications. In: The Role of LCA in Raw Material Sustainability, Circularity and Criticality: Abstract Book. virtual. 12 Oktober 2022.

Conference-paper

- ARENAS, Luis Fernando und Thomas TUREK, 2022. Effect of ammonium ions on a sulfonated anthraquinone-iron sulphate flow battery. In: A design tool for tubular redox flow stacks [online]. Brussels, Belgium: Swanbarton Limited. 27 Juni 2022. S. 12–13. ISBN 978-1-916200-42-5. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/20.500.12738/13526>.
- BENGER, Ralf, Frank DEBLON, Jacob KLINK und Ines HAUER, 2022. Identifying battery storage systems to ensure stable grid operation. In: Kraftwerk Batterie - Advanced Battery Power [online]. Münster: Unpublished. 28 März 2022. [Zugriff am: 2 Juni 2023]. Verfügbar unter: /2022.battery-power.eu/wp-content/uploads/2022/03/Poster_Grid-Batt_P4-014_20220311.pdf.
- BLUME, Nick, Maik BECKER, Thomas TUREK und Christine MINKE, 2022. Environmental modeling of a MW-scale vanadium flow battery - scenarios up to 2050. In: International Flow Battery Forum – IFFB 2022. Brussels, Belgium. 27 Juni 2022. S. Page 20.
- BLUME, Nick und Christine MINKE, 2022. Prospektive LCA einer Vanadium Flow Batterie. In: Ökobilanzwerkstatt Darmstadt 2022. virtual. 21 September 2022.
- BLUME, Nick, Thomas TUREK und Christine MINKE, 2022. Life cycle assessment of an industrial vanadium flow battery – identification of environmental potentials. In: SETAC Europe 32th Annual Meeting 2022. Copenhagen, Denmark. 15 Mai 2022.
- GERLACH, Jana, Alexandra SCHEUNERT und Michael H. BREITNER, 2022. Personal Data Protection Rules! Guidelines for Privacy-friendly smart Energy Services. In: Proceedings of the 30th European Conference on Information Systems (ECIS 2022) in Timisoara, Romania [online]. Timisoara, Romania. 18 Juni 2022. Verfügbar unter: https://www.iwi.uni-hannover.de/fileadmin/iwi/Publikationen/2022_Gerlach_Abstract__ECIS.pdf.
- GÜMÜSKESEN, Mehmet Ali, Sebastian WENDT, Stephan KABELAC und Thomas GIMPEL, 2022. Controlling the wettability of titanium surfaces via femtosecond laser for plate heat exchangers. In: Annual Meeting on Reaction Engineering and ProcessNet Subject Division Heat and Mass Transfer 2022. Würzburg/Germany: Dechema. 21 März 2022.
- HEBENBROCK, André, Fangqi LI, Wolfgang SCHADE und Thomas TUREK, 2022. Fibre Optic Sensor Options for Prognostic Health Management in Harsh Conditions. In: International Battery Production Conference IBPC 2022. Braunschweig. 7 November 2022.
- HELM, Sebastian, Ines HAUER, M. WASSNER, U. WUNDERWALD und Ralf BENGER, 2022. Optimal battery cells for grid serving applications. In: Kraftwerk Batterie 2022. Münster. 30. Juni 2022.

- HOFFMANN, Viktor, Dorian HÜNE, Luise HOFFMANN, Lukas LENTZ, Wolfgang SCHADE, Thomas TUREK und Thomas GIMPEL, 2022. Boosting hydrogen technologies with femtosecond laser structured catalysts. In: European Hydrogen Energy Conference (EHEC) 2022. Madrid, Spain. 18 Mai 2022.
- HOPPE, A., Janis GERHARDT-MÖRSDORF und Christine MINKE, 2022. Vergleichende LCA von Hoch- und Niedertemperatur-verfahren zur Wasserelektrolyse. In: Ökobilanzwerkstatt Darmstadt 2022. virtual. 21 September 2022.
- HÜNE, Dorian, B. BENSMAN, L. STEIN, Wolfgang SCHADE und Thomas GIMPEL, 2022. Simultaneous surface structuring and alloying of titanium fiber material for porous transport layers in PEM-Electrolysis. In: European Hydrogen Energy Conference (EHEC) 2022. Madrid, Spain. 18 Mai 2022.
- KELLER, Jens und Holger FRITZE, 2022. Messaufbau zur Untersuchung von Wasserstoff-Transportprozessen in planaren dünnen Schichten bei hohen Temperaturen. In: 16. Dresdner Sensor-Symposium 2022 [online]. Dresden: AMA Service GmbH. 5 Dezember 2022. ISBN 978-3-9819376-7-1. Verfügbar unter: <https://dechema.de/dss16.html>.
- KOHLMANN, Dhyan, Hendrik WULFMEIER, Marvin SCHEWE, Christian REMBE und Holger FRITZE, 2022. Messung extrem kleiner chemischer Ausdehnungen von Cer-Mischoxid-schichten bei hohen Temperaturen. In: 16. Dresdner Sensor-Symposium 2022 [online]. Dresden: AMA Service GmbH. 5 Dezember 2022. ISBN 978-3-9819376-7-1. Verfügbar unter: <https://dechema.de/dss16.html>.
- LENTZ, Lukas, Madita LEDERLE-FLAMM, Luise HOFFMANN und Thomas GIMPEL, 2022. Characterization of gas bubble evolution on femtosecond laser functionalized catalysts. In: Annual Meeting on Reaction Engineering and ProcessNet Subject Division Heat and Mass Transfer 2022. Würzburg/Germany: Dechema. 21 März 2022.
- MINKE, Christine, Guillermo BABILONIA, Pahola BENAVIDES und Nick BLUME, 2022. Investigating the link between life cycle assessment and circularity indicators: a SETAC/ACLCA working group. In: SETAC Europe 32th Annual Meeting 2022. Copenhagen, Denmark. 15 Mai 2022.
- MINKE, Christine und R. MALLWITZ, 2022. Life Cycle Assessment and Recycling of Power Electronics above kW. In: European Center for Power Electronics Meeting. virtual. 22 September 2022.
- Videoaufnahme**
- Versorgungssicherheit und beschleunigte Energiewende – wie schaffen wir das?, 2022. [online]. [Youtube Video]. #wissenschaft-zukunft-Bürgertalk des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=0tYYEEVorQQ>.
- Vortrag**
- BENGER, Ralf, 2022a. GridBatt – Battery technologies to ensure stable grid operation. Technologien zur Netzverlustreduktion und Netzstabilisierung in Brasilien [online]. virtuelle Informationsreise des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen der Exportinitiative Energie. virtual. 06. - 24.06.2022. Verfügbar unter: <https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/DE/Veranstaltungen/Intern/2022/Infreisen/ir-brasilien.html>.
- BENGER, Ralf, 2022b. Charakterisieren und Erkennen sicherheitsrelevanter Zustände von Lithium-Ionen-Batterien. Batterieforum Deutschland 2022. Konferenz. virtual. 19 Januar 2022.
- KLINK, Jacob, 2022. Herausforderungen der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien. TUC Science Days Circular Economy-Nachhaltige Energiesysteme. Clausthal-Zellerfeld. 14 Oktober 2022.
- Zeitschriftenartikel**
- BERNÄCKER, Christian I., Thomas GIMPEL, Alexander BOMM, Thomas RAUSCHER, Sebastian MAUERMANN, Mingji LI, Eike G. HÜBNER, Wolfgang SCHADE und Lars RÖNTZSCH, 2022. Short pulse laser structuring as a scalable process to produce cathodes for large alkaline water electrolyzers. *Journal of Power Sources*. August 2022. Bd. 538, S. 231572. DOI 10.1016/j.jpowsour.2022.231572.
- BLUME, Nick, Maik BECKER, Thomas TUREK und Christine MINKE, 2022. Life cycle assessment of an industrial-scale vanadium flow battery. *Journal of Industrial Ecology*. Oktober 2022. Bd. 26, Nr. 5, S. 1796–1808. DOI 10.1111/jiec.13328.

EST-Publikationen 2023

Buch

BECK, Hans-Peter (Hrsg.), 2023. ReserveBatt – Momentanreserve mit Hochleistungsbatterien: Systemdienstleistungen für den stabilen und sicheren Betrieb des Energieversorgungssystems: Abschlussbericht. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen.

BECK, Hans-Peter und Jens ZUM HINGST (Hrsg.), 2023. Energie und Wasserspeicher Harz - Kopplung nachhaltiger Systemdienstleistungen zur Energiespeicherung, zum Hochwasserschutz und zur Ressourcensicherung (EWAZ): Abschlussbericht: Laufzeit des Verbundprojektes 01.07.2019 bis zum 30.09.2022. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier. Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen. ISBN 978-3-7369-7875-1.

Buchteil

BUCHHOLZ, Sebastian, Alexandra SCHEUNERT, Hartmut WEYER und Cornelius BIEDERMANN, 2023. Research Project SiNED Insights – Ancillary Services for Reliable Power Grids in Times of the Progressive German Energiewende and Digital Transformation. In: Michael SCHWAN (Hrsg.), Die Energiewende beschleunigen: ETG-Kongress 2023: 25.-26. Mai 2023 in Kassel [online]. Berlin: VDE Verlag. S. 905–912. ETG-Fachbericht. ISBN 978-3-8007-6108-1. Verfügbar unter: www.vde-verlag.de/proceedings-en/456108132.html.

MINKE, Christine und Thomas TUREK, 2023. Techno-economic modelling and evaluation of flow batteries. In: Christina ROTH, Jens NOACK und M. SKYLLAS-KAZACOS (Hrsg.), Flow Batteries: from fundamentals to applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH: Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. S. 463–485. ISBN 3-527-83277-7.

Dissertation

BAUER, Stina, 2023. Evaluierung von Chinon- und Indigosulfonsäuren für organische Redox-Flow-Batterien. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 2023. Clausthal-Zellerfeld: Technische Universität Clausthal.

KLAAS, Ann-Kathrin, 2023. Speicherauslegung und Betriebsführung von Wasserstoff-Druckluftspeicherkraftwerken (HCAES) bei simultaner Teilnahme an verschiedenen Energiemärkten. Dissertation. Göttingen: Technische Universität Clausthal.

KRETH, Nils, 2023. Energiewirtschaftliche Systemintegration eines CO₂-armen Hüttenwerks unter aktiver Anwendung der Sektorenkopplung. Göttingen: Technische Universität Clausthal.

SPIELMANN, Verena, 2023. Einfluss der elektrischen und thermischen Speicherkapazität auf die Netzbelastung bei Einfamilienhäusern mit regenerativer Eigenerzeugung, Elektrowärmepumpenheizung und hohem Autarkiegrad. Göttingen: Technische Universität Clausthal.

Dokument

KIRSTEIN, Fabian, 2023. Modellierung und Regelungsoptimierung alkalischer Wasserelektrolyseure unter Berücksichtigung regenerativer Lastprofile. September 2023.

MÖCHEL, Ole, 2023. Untersuchung der aktiven Oberfläche von Elektroden für den Einsatz in der alkalischen Wasserelektrolyse. Bachelorarbeit. April 2023.

WIESNER, Amke, 2023. Experimentelle Untersuchung des Einflusses verschiedener Zellaufbauten auf die drucklose alkalische Wasserelektrolyse. Oktober 2023.

XU, Jiayue, 2023. Experimentelle Untersuchungen von Maßnahmen zur Propagationshemmung des thermischen Durchgehens in Li-Ionen-Batteriemodulen. September 2023.

Conference-Paper

APPELHAUS, Simon, Oliver ZIELINSKI, Felix GÄDE, Stina BAUER, Maik BECKER und Thomas TUREK, 2023. Application-oriented investigation of alkaline water electrolysis from lab scale to industrial short stacks. In: 2. H₂Giga-Statuskonferenz 2023. AXICA Kongress- und Tagungszentrum Berlin. 20 September 2023.

BREMER, Jens, 2023. Enabling Load-Flexible Ammonia Synthesis via polytropic Fixed-Bed Reactors. In: Clausthal Conference on Circular Economy: CCCE 2023 [online]. Clausthal-Zellerfeld. 24.11.2023. Verfügbar unter: <https://www.tu-clausthal.de/ccce>.

- FISCHER, Lars Henry, Luis Fernando ARENAS, Torben LEMMERMANN, Ulrich KUNZ und Thomas TUREK, 2023. Characterization of an organic aqueous alkaline all-iron flow battery with a scalable test bench system. In: The International Flow Battery Forum: Corinthia Hotel, Prague, Czech Republic, 27 -29 June 2023. Prague, Czech Republic: IFBF The International Flow Battery Forum. 27 Juni 2023.
- HEBENBROCK, André, Valerie Nastassia MOHNI, Daniel SCHRÖDER und Thomas TUREK, 2023. Model-assisted scalability approach for single-layer lithium-ion battery cells. In: 19th Symposium on Fuel Cell and Battery Modeling and Experimental Validation (Duisburg, 21. März 2023 - 23. März 2023). Mercatorhalle - Duisburg, Germany. 21 März 2023.
- HEBENBROCK, André, Wolfgang SCHADE und Thomas TUREK, 2023. Fibre optic sensor options for the assessment of lithium-ion pouch cell degradation and safety. In: Advanced Battery Power - Kraftwerk Batterie 2023. Aachen. 27 April 2023.
- HEBENBROCK, André, Thomas TUREK und Wolfgang SCHADE, 2023. Novel Anode Embedding Method of FBG Sensors for Enhanced Diagnostics. In: International Battery Production Conference IBPC 2023 [online]. Steigenberger Parkhotel Braunschweig, Germany. 7 November 2023. Verfügbar unter: <https://battery-production-conference.de/>.
- KOHLMANN, Dhyan, Hendrik WULFMEIER, Holger FRITZE, Marvin SCHEWE und Christian REMBE, 2023. P37 - Detection of nm-Scale Displacements at Frequencies down to 1 mHz by Differential Laser Doppler Vibrometry. In: Poster [online]. Nürnberg: AMA Service GmbH, Von-Münchhausen-Str. 49, 31515 Wunstorf, Germany. 2023. S. 352–353. [Zugriff am: 16 Februar 2024]. Verfügbar unter: <https://www.ama-science.org/doi/10.5162/SMSI2023/P37>.
- LANGFELD, Oliver, 2023. Blue Mining - Mine Planning in the context of the Circular Economy. In: Clausthal Conference on Circular Economy: CCCE 2023 [online]. Clausthal-Zellerfeld. 24.11 2023. Verfügbar unter: <https://www.tu-clausthal.de/ccce>.
- NEIDHART, Magdalena, Pavel MARDILOVICH, Nick BLUME und Christine MINKE, 2023. Life Cycle Assessment of a VFB powered by wind and PV – real-world use cases. In: International Flow Battery Forum – IFBF 2023. Prague, Czech Republic. 26 Juni 2023.
- WEYER, Hartmut, 2023. Die Wasserstoffwirtschaft als Teil der Circular Economy. In: Clausthal Conference on Circular Economy: CCCE 2023br [online]. Clausthal-Zellerfeld. 23 November 2023. Verfügbar unter: <https://www.tu-clausthal.de/ccce>.
- ZIELINSKI, Oliver, Simon APPELHAUS, Amke WIESNER, Maik BECKER und Thomas TUREK, 2023. Zellentwicklung und Materialcharakterisierung zur Entwicklung neuer Zelldesigns für Wasserelektrolysestacks. In: Studi-Science Day 2023. TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld. 29 Juni 2023.
- ZIELINSKI, Oliver, Maik BECKER und Thomas TUREK, 2023. A new Approach to Kinetic Investigations in Water Electrolysis under Realistic Conditions. In: 74th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry : Bridging Scientific Disciplines to Address the World's Challenges [online]. Lyon, France. 3 September 2023. Verfügbar unter: https://fpa.fontismedia.com/infiles/doc_production/ise233389.pdf.
- ZIELINSKI, Oliver, Felix GÄDE, Stina BAUER, Simon APPELHAUS, Aaron REHMER, Thomas TUREK und Maik BECKER, 2023. Testing of a Pilot-Plant for the Characterization and Validation of Novel Alkaline Water Electrolysis Stacks. In: CCCE: Clausthal Conference on Circular Economy 2023 [online]. Clausthal-Zellerfeld. 23 November 2023. Verfügbar unter: <https://www.tu-clausthal.de/ccce>.

Videoaufnahme

- Sicherung von Rohstoffen und Ressourcen, 2023. [online]. [Video]. virtual: TU Clausthal Videosever. Studi-Science Day 2023. Verfügbar unter: <https://video.tu-clausthal.de/film/1345.html>.
- Zukunft unserer Energiesysteme, 2023. [online]. [Video]. virtual: TU Clausthal Videosever. Studi-Science Day 2023. Verfügbar unter: <https://video.tu-clausthal.de/film/1345.html>.

Vortrag

- GANZER, Leonhard, 2023. Current Research and Perspectives on Hydrogen Storage and Underground Methanation in Germany. Sino-German Underground Clean Energy System Forum. Conference. Chengdu, China. 22 September 2023.

- HOU, Michael Zhengmeng, 2023. A Regenerative EGS for Heat and Electricity Production as well as Energy Storage. Sino-German Underground Clean Energy System Forum. Conference. Chengdu, China. 22 September 2023.
- TUREK, Thomas, 2023. Pilot-scale testing of a novel alkaline water electrolysis stack. 4th International Conference on Electrolysis (ICE 2023) [online]. Sun City Resort, South Africa. 27 September 2023. Verfügbar unter: <https://engineering.nwu.ac.za/hysa/ice-2023>.
- Zeitschriftenartikel**
- BECKER, Maik und Thomas TUREK, 2023. Produktion von grünem Wasserstoff optimieren. *Technologie-Informationen: ti*. 2023. Bd. 2, S. 12–13.
- BENGER, Ralf, 2023a. Auf der Suche nach der idealen Batterie. *Technologie-Informationen: ti*. 2023. Bd. 2, S. 20.
- BENGER, Ralf, 2023b. Sicherer Betrieb von Lithium-Ionen-Batterien. *Technologie-Informationen: ti*. 2023. Bd. 2, S. 21.
- BLUME, Nick, Magdalena NEIDHART, Pavel MARDILOVICH und Christine MINKE, 2023. Life cycle assessment of a vanadium flow battery based on manufacturer data. *Procedia CIRP*. 2023. Bd. 116, S. 648–653. DOI 10.1016/j.procir.2023.02.109.
- BRENNER, Gunther und Jens-Peter SPRINGMANN, 2023. Erdwärme umweltgerecht und wirtschaftlich nutzen. *Technologie-Informationen: ti*. 2023. Bd. 2, S. 18.
- CAIANIELLO, Carlo, Luis Fernando ARENAS, Thomas TUREK und René WILHELM, 2023a. A Hydroxylated Tetracationic Viologen based on Dimethylaminoethanol as a Negolyte for Aqueous Flow Batteries. *Batteries & Supercaps*. Januar 2023. Bd. 6, Nr. 1, S. e202200355. DOI 10.1002/batt.202200355.
- CAIANIELLO, Carlo, Luis Fernando ARENAS, Thomas TUREK und René WILHELM, 2023b. Cover Feature: A Hydroxylated Tetracationic Viologen based on Dimethylaminoethanol as a Negolyte for Aqueous Flow Batteries. *Batteries & Supercaps* [online]. Januar 2023. Bd. 6, Nr. 1. [Zugriff am: 30 Mai 2023]. DOI 10.1002/batt.202200540. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/batt.202200540>.
- CAIANIELLO, Carlo, Luis Fernando ARENAS, Thomas TUREK und René WILHELM, 2023c. Characterization of an Aqueous Flow Battery Utilizing a Hydroxylated Tetracationic Viologen and a Simple Cationic Ferrocene Derivative. *Advanced Energy and Sustainability Research*. Oktober 2023. Bd. 4, Nr. 10, S. 2300077. DOI 10.1002/aesr.202300077.
- CHEN, Qianjun, Zhengmeng HOU, Xuning WU, Shengyou ZHANG, Wei SUN, Yanli FANG, Lin WU, Liangchao HUANG und Tian ZHANG, 2023. A Two-Step Site Selection Concept for Underground Pumped Hydroelectric Energy Storage and Potential Estimation of Coal Mines in Henan Province. *Energies*. 20 Juni 2023. Bd. 16, Nr. 12, S. 4811. DOI 10.3390/en16124811.
- EMMEL, Dominik, Simon KUNZ, Nick BLUME, Yongchai KWON, Thomas TUREK, Christine MINKE und Daniel SCHRÖDER, 2023. Benchmarking organic active materials for aqueous redox flow batteries in terms of lifetime and cost. *Nature Communications*. 21 Oktober 2023. Bd. 14, Nr. 1, S. 6672. DOI 10.1038/s41467-023-42450-9.
- GARCÍA-LÓPEZ, Inmaculada, Luis Fernando ARENAS, Thomas TUREK, Vicente Ismael ÁGUEDA und Amalio GARRIDO-ESCUADERO, 2023. Mass transfer enhancement in electrochemical flow cells through 3D-printed biomimetic channels. *Reaction Chemistry & Engineering*. 2023. Bd. 8, Nr. 7, S. 1776–1784. DOI 10.1039/D3RE00053B.
- GENTHE, Sascha, Luis F. ARENAS, Ulrich KUNZ und Thomas TUREK, 2023. Long-Term Performance of a Zinc–Silver/Air Hybrid Flow Battery with a Bifunctional Gas-Diffusion Electrode at High Current Density. *Energy Technology*. September 2023. Bd. 11, Nr. 9, S. 2300552. DOI 10.1002/ente.202300552.
- GUO, Yilin, Zhengmeng HOU, Yanli FANG, Qichen WANG, Liangchao HUANG, Jiashun LUO, Tianle SHI und Wei SUN, 2023. Forecasting and Scenario Analysis of Carbon Emissions in Key Industries: A Case Study in Henan Province, China. *Energies*. 16 Oktober 2023. Bd. 16, Nr. 20, S. 7103. DOI 10.3390/en16207103.
- HOU, Michael Z., Lara M. GOTTFRIED und Ye YUE, 2023. Die China Woche an der TU Clausthal als eine interkulturelle Kommunikationsplattform für Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. *Interkulturelles Forum der deutsch-chinesischen Kommunikation*. 31 März 2023. Bd. 2, Nr. 2, S. 265–285. DOI 10.1515/ifdck-2022-0008.

- HOU, Zhengmeng, Liangchao HUANG, Yachen XIE, Lin WU, Yanli FANG, Qichen WANG und Yilin GUO, 2023. Economic Analysis of Methanating CO₂ and Hydrogen-Rich Industrial Waste Gas in Depleted Natural Gas Reservoirs. *Energies*. 23 April 2023. Bd. 16, Nr. 9, S. 3633. DOI 10.3390/en16093633.
- HOU, Zhengmeng, Lin WU und Liehui ZHANG, 2023. CO₂-based underground biochemical synthesis of natural gas coupled with geothermal energy production: Technology system, challenges, and prospects[J]. *Natural Gas Industry*. 2023. Bd. 43, Nr. 11, S. 181–190.
- HOU, Zheng-Meng, Ying XIONG, Jia-Shun LUO, Yan-Li FANG, Muhammad HARIS, Qian-Jun CHEN, Ye YUE, Lin WU, Qi-Chen WANG, Liang-Chao HUANG, Yi-Lin GUO und Ya-Chen XIE, 2023. International experience of carbon neutrality and prospects of key technologies: Lessons for China. *Petroleum Science*. April 2023. Bd. 20, Nr. 2, S. 893–909. DOI 10.1016/j.petsci.2023.02.018.
- HUANG, Liangchao, Zhengmeng HOU, Yanli FANG, Jianhua LIU und Tianle SHI, 2023. Evolution of CCUS Technologies Using LDA Topic Model and Derwent Patent Data. *Energies*. 8 März 2023. Bd. 16, Nr. 6, S. 2556. DOI 10.3390/en16062556.
- HURSKYY, Stepan, Uliana YAKHNEVYCH, Claudia KOFAHL, Eva TICHY-RACS, Harald SCHMIDT, Steffen GANSCHOW, Holger FRITZE und Yuriy SUHAK, 2023. Electrical properties and temperature stability of Li-deficient and near stoichiometric Li(Nb,Ta)O₃ solid solutions up to 900 °C. *Solid State Ionics*. Oktober 2023. Bd. 399, S. 116285. DOI 10.1016/j.ssi.2023.116285.
- KAISER, Marcel, Felix GÄDE, Jörn BRAUNS und Thomas TUREK, 2023a. Enhancing Nickel-Iron Gas Diffusion Electrodes for Oxygen Evolution in Alkaline Water Electrolysis. *Catalysts*. September 2023. Bd. 13, Nr. 9, S. 1266. DOI 10.3390/catal13091266.
- KAISER, Marcel, Felix GÄDE, Jörn BRAUNS und Thomas TUREK, 2023b. Enhancing Nickel-Iron Gas Diffusion Electrodes for Oxygen Evolution in Alkaline Water Electrolysis. *Catalysts*. 1 September 2023. Bd. 13, Nr. 9, S. 1266. DOI 10.3390/catal13091266.
- KLINK, Jacob, Jens GRABOW, Nury ORAZOV, Ralf BENDER, Ines HAUER und Hans-Peter BECK, 2023. Systematic Approach for the Test Data Generation and Validation of ISC/ESC Detection Methods. *Batteries*. 22 Juni 2023. Bd. 9, Nr. 7, S. 339. DOI 10.3390/batteries9070339.
- KOHLMANN, Dhyhan, Hendrik WULFMEIER, Marvin SCHEWE, Thomas DEFFERRIERE, Christian REMBE, Harry L. TULLER und Holger FRITZE, 2023. High-temperature chemical expansion of Pr_{0.1}Ce_{0.9}O_{2-δ} thin films determined by Differential Laser Doppler Vibrometry. *Solid State Ionics*. April 2023. Bd. 392, S. 116151. DOI 10.1016/j.ssi.2023.116151.
- KOHLMANN, Dhyhan, Hendrik WULFMEIER, Marvin SCHEWE, Iurii KOGUT, Carsten STEINER, Ralf MOOS, Christian REMBE und Holger FRITZE, 2023. Chemical expansion of CeO_{2-δ} and Ce_{0.8}Zr_{0.2}O_{2-δ} thin films determined by laser Doppler vibrometry at high temperatures and different oxygen partial pressures. *Journal of Materials Science*. Januar 2023. Bd. 58, Nr. 4, S. 1481–1504. DOI 10.1007/s10853-022-07830-4.
- LEMMERMANN T., Becker M., Stehle M., Drache M., Beuermann S., Gohs U., Fittschen U.E.A., Turek T., Kunz U. (2023) Monitoring of vanadium mass transfer using redox potential probes inside membranes during charge and discharge of flow batteries: An experimental study. Preprint available at SSRN. <http://doi.org/10.2139/ssrn.4580119>.
- LI, Heling, Liang TANG, Tim T. WERNER, Zhengmeng HOU, Fan MENG und Jingjing LI, 2023. Spatiotemporal mapping of (ultra-) mafic magmatic mine areas: Implications of economic and political realities in China. *Deep Underground Science and Engineering*. 7 Dezember 2023. S. dug2.12067. DOI 10.1002/dug2.12067.
- LIAO, Jianxing, Ke HU, Faisal MEHMOOD, Bin XU, Yuhang TENG, Hong WANG, Zhengmeng HOU und Yachen XIE, 2023. Embedded discrete fracture network method for numerical estimation of long-term performance of CO₂-EGS under THM coupled framework. *Energy*. Dezember 2023. Bd. 285, S. 128734. DOI 10.1016/j.energy.2023.128734.
- LIAO, Jianxing, Hong WANG, Faisal MEHMOOD, Cao CHENG und Zhengmeng HOU, 2023. An anisotropic damage–permeability model for hydraulic fracturing in hard rock. *Acta Geotechnica*. Juli 2023. Bd. 18, Nr. 7, S. 3661–3681. DOI 10.1007/s11440-022-01793-1.
- LIAO, Jianxing, Bin XU, Faisal MEHMOOD, Ke HU, Hong WANG, Zhengmeng HOU und Yachen XIE, 2023. Numerical study of the long-term performance of EGS based on discrete fracture network with consideration of fracture deformation. *Renewable Energy*. November 2023. Bd. 216, S. 119045. DOI 10.1016/j.renene.2023.119045.

- LIU, Hejuan, Chunhe YANG, Jianjun LIU, Zhengmeng HOU, Yachen XIE und Xilin SHI, 2023. An overview of underground energy storage in porous media and development in China. *Gas Science and Engineering*. September 2023. Bd. 117, S. 205079. DOI 10.1016/j.jgsce.2023.205079.
- LIU, Jianhua, Tianle SHI, Zhengmeng HOU, Liangchao HUANG und Lingyu PU, 2023. Analysis of spatiotemporal patterns and determinants of energy-related carbon emissions in the Yellow River basin using remote sensing data. *Frontiers in Energy Research*. 6 Juli 2023. Bd. 11, S. 1231322. DOI 10.3389/fenrg.2023.1231322.
- LUO, Jiashun, Yachen XIE, Michael Z. HOU, Ying XIONG, Xunning WU, Christian Truitt LÜDDEKE und Liangchao HUANG, 2023. Advances in subsea carbon dioxide utilization and storage. *Energy Reviews*. März 2023. Bd. 2, Nr. 1, S. 100016. DOI 10.1016/j.enrev.2023.100016.
- TUREK, Thomas, 2023. Kohlenstoffdioxid in chemischer Kreislaufwirtschaft nutzen. *Technologie-Informationen: ti*. 2023. Bd. 2, S. 24.
- WANG, Qichen, Zhengmeng HOU, Yilin GUO, Liangchao HUANG, Yanli FANG, Wei SUN und Yuhan GE, 2023. Enhancing Energy Transition through Sector Coupling: A Review of Technologies and Models. *Energies*. 7 Juli 2023. Bd. 16, Nr. 13, S. 5226. DOI 10.3390/en16135226.
- WEYER, Hartmut, 2023a. Anreizregulierung in der Post-EuGH-Welt. *DVBl - Deutsches Verwaltungsblatt*. 2023. S. 1318–1325.
- WEYER, Hartmut, 2023b. Die Anreizregulierung nach dem Regierungsentwurf zur Anpassung des Energiewirtschaftsrechts an unionsrechtlichen Vorgaben. *Recht der Energiewirtschaft: RdE*. 2023. S. 309–316.
- WU, Lin, Zhengmeng HOU, Zhifeng LUO, Liangchao HUANG, Ying XIONG, Faisal MEHMOOD, Jianhua LIU, Wei SUN und Yachen XIE, 2023. Efficiency assessment of underground biomethanation with hydrogen and carbon dioxide in depleted gas reservoirs: A biogeochemical simulation. *Energy*. November 2023. Bd. 283, S. 128539. DOI 10.1016/j.energy.2023.128539.
- WU, Lin, Zhengmeng HOU, Zhifeng LUO, Ying XIONG, Nanlin ZHANG, Jiashun LUO, Yanli FANG, Qianjun CHEN und Xuning WU, 2023. Numerical simulations of supercritical carbon dioxide fracturing: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Juli 2023. Bd. 15, Nr. 7, S. 1895–1910. DOI 10.1016/j.jrmge.2022.08.008.
- WU, Lin, Zhengmeng HOU, Yachen XIE, Zhifeng LUO, Liangchao HUANG, Xuning WU, Jiashun LUO, Yanli FANG, Qianjun CHEN, Wei SUN, Christian Truitt LÜDDEKE und Lei YANG, 2023. Carbon capture, circular utilization, and sequestration (CCUS): A multifunctional technology coupling underground biomethanation with geothermal energy production. *Journal of Cleaner Production*. November 2023. Bd. 426, S. 139225. DOI 10.1016/j.jclepro.2023.139225.
- WU, Lin, Zhengmeng HOU, Yachen XIE, Zhifeng LUO, Ying XIONG, Long CHENG, Xuning WU, Qianjun CHEN und Liangchao HUANG, 2023. Fracture initiation and propagation of supercritical carbon dioxide fracturing in calcite-rich shale: A coupled thermal-hydraulic-mechanical-chemical simulation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Juli 2023. Bd. 167, S. 105389. DOI 10.1016/j.ijrmms.2023.105389.
- XIE, Yachen, Michael Z. HOU und Cunbao LI, 2023. Anisotropic characteristics of acoustic emission and the corresponding multifractal spectrum during progressive failure of shale under cyclic loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Mai 2023. Bd. 165, S. 105364. DOI 10.1016/j.ijrmms.2023.105364.
- XIE, Yachen, Michael Z. HOU, Hejuan LIU und Cunbao LI, 2023. Anisotropic time-dependent behaviors of shale under direct shearing and associated empirical creep models. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Juni 2023. S. S1674775523001427. DOI 10.1016/j.jrmge.2023.05.001.
- XIE, Yachen, Jianhua LIU, Jianwei TANG, Liangchao HUANG, Zhengmeng HOU, Jiashun LUO, Gensheng LI, Hans-Peter BECK und Chunhe YANG, 2023. Large-Scale Underground Storage of Renewable Energy Coupled with Power-to-X: Challenges, Trends, and Potentials in China. *Engineering*. August 2023. S. S2095809923002898. DOI 10.1016/j.eng.2023.04.014.
- XIE, Yachen, Xuning WU, Zhengmeng HOU, Zaoyuan LI, Jiashun LUO, Christian Truitt LÜDDEKE, Liangchao HUANG, Lin WU und Jianxing LIAO, 2023. Gleaning insights from German energy transition and large-scale underground energy storage for China's carbon neutrality. *International Journal of Mining Science and Technology*. Mai 2023. Bd. 33, Nr. 5, S. 529–553. DOI 10.1016/j.ijmst.2023.04.001.

- XIONG, Ying, Zhengmeng HOU, Heping XIE, Jinzhou ZHAO, Xiucheng TAN und Jiashun LUO, 2023. Microbial-mediated CO₂ methanation and renewable natural gas storage in depleted petroleum reservoirs: A review of biogeochemical mechanism and perspective. *Gondwana Research*. Oktober 2023. Bd. 122, S. 184–198. DOI 10.1016/j.gr.2022.04.017.
- XIONG, Ying, Xiucheng TAN, Bo LIU, Zhengmeng HOU, Jiashun LUO, Lin WU, Feifan LU und Di XIAO, 2023. On the dissolution paths and formation mechanisms of paleokarst reservoirs: Constraints from reactive transport modeling. *Marine and Petroleum Geology*. Oktober 2023. Bd. 156, S. 106462. DOI 10.1016/j.marpetgeo.2023.106462.
- XU, Lei, Liang TANG, Xiaolin ZHANG, Zhengmeng HOU, Muhammad HARIS, Jiashun LUO und Yuanliang YANG, 2023. Mine waste water self-purification (arsenic) in neutral hydrogeochemical ecosystem: A case study from V-Ti-Fe mine tailings. *Geochemistry*. Mai 2023. Bd. 83, Nr. 2, S. 125947. DOI 10.1016/j.chemer.2022.125947.
- YAKHNEVYCH, Uliana, Claudia KOFAHL, Stepan HURSKYY, Steffen GANSCHOW, Yuriy SUHAK, Harald SCHMIDT und Holger FRITZE, 2023. Charge transport and acoustic loss in lithium niobate-lithium tantalate solid solutions at temperatures up to 900 °C. *Solid State Ionics*. April 2023. Bd. 392, S. 116147.
- YAKHNEVYCH, Uliana, Claudia KOFAHL, Stepan T. HURSKYY, Steffen GANSCHOW, Yuriy D. SUHAK, Harald SCHMIDT und Holger FRITZE, 2023. Charge transport and acoustic loss in lithium niobate-lithium tantalate solid solutions at temperatures up to 900 °C. *Solid State Ionics*. April 2023. Bd. 392, S. 116147. DOI 10.1016/j.ssi.2023.116147.
- YANG, Jianxiong, Jianfeng LIU, Haoyong HUANG, Xiangchao SHI, Zhengmeng HOU und Guanlong GUO, 2023. An equivalent thermo-hydro-mechanical model for gas migration in saturated rocks. *Gas Science and Engineering*. Dezember 2023. Bd. 120, S. 205110. DOI 10.1016/j.jgsce.2023.205110.
- ZHANG, Xiaolin, Yinger DENG, Liang TANG, Zhengmeng HOU und Jinsong YANG, 2023. Chemical weathering profile in the V-Ti-Fe mine tailings pond: a basalt-weathering analog. *Acta Geochimica*. Dezember 2023. Bd. 42, Nr. 6, S. 1035–1050. DOI 10.1007/s11631-023-00635-5.
- Covers**
- GENTHE S., Arenas L.F., Kunz U., Turek T. (2023) Issue Back Cover: Long-term performance of a zinc-silver/air hybrid flow battery with a bifunctional gas-diffusion electrode at high current density. *Energy Technology*, 11(9). <https://doi.org/10.1002/ente.202370093>.
- Conference proceedings**
- CAIANIELLO C., Arenas L.F., Turek T., Wilhelm R. (2023) A novel hydroxylated tetracationic viologen for aqueous flow batteries: [(DMAE-Pr)₂-Vi]. *International Flow Battery Forum 2023, Conference Papers*. Swanbarton Ltd. Prague, Czechia. pp. 20–21.
- Posters**
- FISCHER L.H., Arenas L.F., Lemmermann T., Kunz U., Turek T. Characterization of an organic aqueous alkaline all-iron flow battery at various operating parameters under a scalable test bench system. 74th Annual Meeting of the ISE. International Society of Electrochemistry. September 4-8, 2023. Lyon, France.
- CAIANIELLO C., Arenas L.F., Turek T., Wilhelm R. A novel hydroxylated tetracationic viologen for aqueous flow batteries: [(DMAE-Pr)₂-Vi]. *International Flow Battery Forum 2023, Corinthia Hotel*, June 27-29, 2023. Prague, Czechia.

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

Anja Klaproth

Bildnachweis

Adobe Stock: S. 4, 8, 16, 70, 72, 76, 82
WiReGo: 74
die drehen, www.diedrehen.de: 65

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.

August 2024

www.tu-clausthal.de