



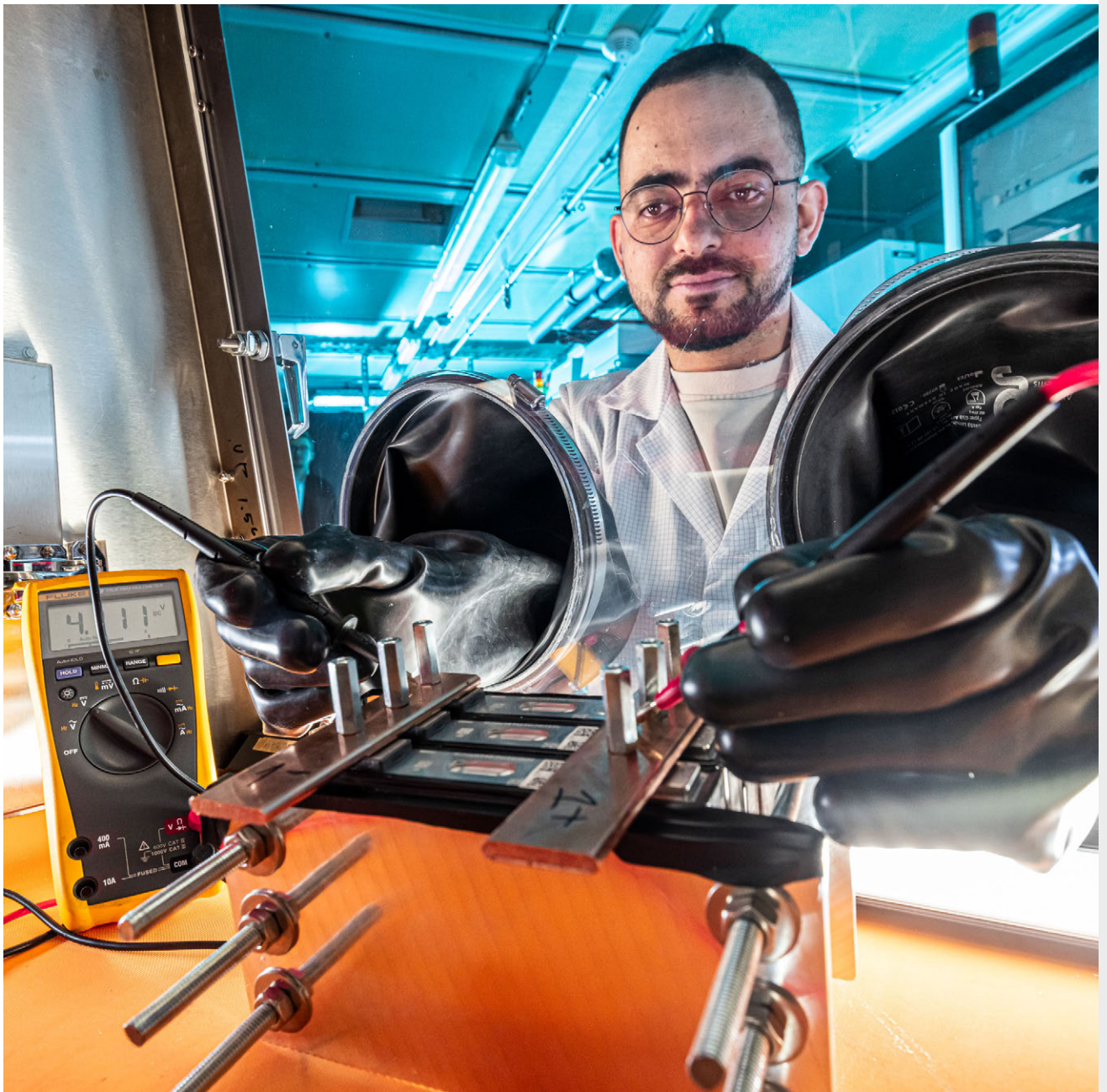
TU Clausthal

EST

Forschungszentrum
Energiespeichertechnologien

Jahresbericht 2024/2025

des Forschungszentrums
Energiespeichertechnologien (EST)



Jahresbericht 2024/2025
des Forschungszentrums
Energiespeichertechnologien (EST)

Inhalt

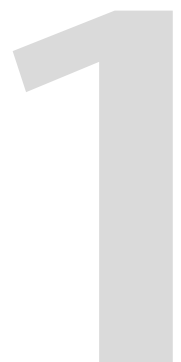
Entwicklung der Forschungsagenda	5
Entwicklung des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien 2024/2025	6
Geschäftsbericht und Infrastruktur	9
Geschäftsbericht 2024/2025.....	10
Strategiebildende Forschungsprojekte in den Jahren 2024/2025	13
VentBatt: Erhöhung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien durch ein innovatives, ventilgesteuertes Gas- und Thermomanagement	14
INNOBATT: Eine Batterie vom Material bis zum System neu denken – ressourcenschonend, leistungstark, innovativ.....	19
ALene: Intelligente Algorithmen und Leistungselektronik für einen netzqualitäts- und energieeffizienten Batteriespeicherbetrieb	24
H2-SEKO: Integration von grünem Wasserstoff in sektorenggekoppelte Energiesysteme.....	28
MacGhyver: Mikrofluidische Abwasserbehandlung und Erzeugung von grünem Wasserstoff durch elektrochemische Reaktionen	31
StaR – Stack Revolution	34
Niedersächsisches Kompetenznetzwerk NextGenPV: Photovoltaik der nächsten Generation	38
Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden	41
TEN.efzn – Forschungsplattform Landesgraduiertenkolleg Wasserstoff und Wasserstoffderivat Ammoniak	46
TEN.efzn Wärme – Hochtemperatur-Großwärmepumpe	51

TEN.efzn - Transformation des Energiesystems Niedersachsen – Forschungsplattform Vertrauenswürdige Digitalisierung sicherheitskritischer Energiesysteme ...	54
SiNED – Systemdienstleistungen für sichere Stromnetze in Zeiten fortschreitender Energiewende und digitaler Transformation – Kompetenzbereich wirtschaftliche und energierechtliche Fragen.....	58
H2-Wegweiser Niedersachsen – Teilprojekt Energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen.....	61
SALSA: Entwicklung applikationsspezifischer Aluminium-Ionen-Batterien unter Nutzung innovativer Passiv- und Aktivmaterialien	65
BLaserKat: Blasenablösecharakteristik und Langzeitstabilität von femtosekundenlaserlegierten Elektrokatalysatoren.....	69
FemtoPlat: Verdampfung und Kondensation in Plattenwärmeübertragern mit funktionalisierten Oberflächen aus einem Femtosekundenlaserprozess	73
Wissenstransfer in die Praxis	79
LiBattFire: Lithium-Ionen-Batterien Feuer- und Gefahrenabwehr	80
EWAZ-Transfer - Transferprojekt zum Energie- und Wasserspeicher Harz	85
Regionaler Wissenstransfer: Das Unternehmergespräch ENERGIE.....	88
Schlaglichter	91
Anhang	97





ENTWICKLUNG DER FORSCHUNGSAGENDA



Entwicklung des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien 2024/2025

Auch in den zurückliegenden zwei Jahren haben die wissenschaftlichen Arbeitsgruppen am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) ihre Forschung in den Technologiefeldern Wasserstoff und Batterien durch neue Projekte vorangetrieben. Insbesondere auch durch die standortübergreifende interdisziplinäre Zusammenarbeit im neuen Niedersächsischen Forschungsprogramm „Transformation des Energiesystems Niedersachsen (TEN.efzn)“ konnte die Sichtbarkeit der disziplinübergreifenden Clausthaler Energieforschung weiter ausgebaut werden.

Ein zentrales Vorhaben im Bereich der Wasserstoffforschung war das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundprojekt „StaR – Stack Revolution“ im Rahmen der nationalen Technologieplattform „H2Giga“. In diesem wurden neue Komponenten der alkalischen Wasserelektrolyse vom Labormaßstab bis hin zu industriellen Elektrolysestacks in einer eigens hierfür entwickelten Testumgebung auf dem EnergieCampus Goslar untersucht. Das Projekt konnte zum Ende des Jahres 2025 erfolgreich abgeschlossen werden; ein Folgeprojekt zu Grundlagen einer dynamischen Betriebsweise des Elektrolyseurs ist zwischenzeitlich angelaufen.

Das Elektrolysetechnikum ist zudem Kernstück eines neuen Infrastrukturvorhabens zur Integration von grünem Wasserstoff in sektorengekoppelte Energiesysteme. Ziel des Projekts „H2-SeKo“ ist die Entwicklung und Erprobung intelligenter Komponenten und Betriebsstrategien zur kombinierten Nutzung elektrischer, stofflicher und thermischer Energieflüsse unter den realen Betriebsbedingungen des EST vor Ort. Darin werden der alkalische Wasserelektrolyseur mit einer großtechnischen Photovoltaikanlage, einem innovativen Wasserstoffspeicher, einem Wasserstoff-Blockheizkraftwerk sowie einer Luftwärmepumpe in das bestehende Energieverbundsystem des EST integriert. Die so erweiterte Infrastruktur wird neue interdisziplinäre wissenschaftliche Fragestellungen aus den Bereichen der Elektrotechnik, der Verfahrenstechnik, der Informations- und Regelungstechnik sowie der Wirtschaftswissenschaften ermöglichen und

auch die Ausbildung von Studierenden unterstützen.

Unter der Gesamtkoordination des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (efzn) ist im Herbst 2024 das disziplin- und standortübergreifende Forschungsprogramm „Transformation des Energiesystems Niedersachsen (TEN.efzn)“ mit einer starken Beteiligung der Clausthaler Energieforschung angelaufen. Mehr als 180 Forschende aus 18 Einrichtungen arbeiten in diesem auf fünf Jahre angelegten Vorhaben in sechs eng miteinander verzahnten Forschungsplattformen an der strategischen Weiterentwicklung und Neuprofilierung der niedersächsischen Energieforschung zusammen. Mit einer Fördersumme von insgesamt 58,2 Millionen Euro aus dem Programm „zukunft.niedersachsen“ ist dieses die höchste Fördersumme, die das Land Niedersachsen gemeinsam mit der VolkswagenStiftung jemals für ein standortübergreifendes Forschungsprogramm in der Energieforschung bewilligt hat. Verschiedenen Arbeitsgruppen des EST sind an drei der insgesamt sechs Forschungsplattformen beteiligt und berichten über die jeweiligen wissenschaftlichen Zielsetzungen sowie erste Zwischenergebnisse.

Als ein Ergebnis langjähriger gemeinsamer Voruntersuchungen der EST-Forschungscluster Materialfunktionalisierung und Systemintegration ist im Sommer 2025 das Verbundprojekt „SALSA“ gestartet. Gemeinsam mit sieben weiteren Kooperationspartnern aus wissenschaftlicher Forschung und Industrie wird darin an der Entwicklung neuer skalierbarer Materialien für wiederaufladbare Aluminium-Ionen-Batterien mit verbesserter Leistungsdichte, Energie-Effizienz und Zyklenfestigkeit gearbeitet. Im Zentrum der Untersuchungen am EST stehen die Charakterisierung der elektrochemischen Prozesse sowie Performanceuntersuchungen der im Verbund weiterentwickelten Zellen auf Labor- und Zellebene.

Neben der wissenschaftlichen Forschung stellte auch der Wissenstransfer in die Praxis weiterhin ein wesentliches Tätigkeitsfeld des EST dar. Um den zahlreichen Fragen (und

auch Mythen) zu stellenweise spektakulären Schadenfällen von Lithium-Ionen-Batterien zu begegnen, haben die Freiwillige Feuerwehr Goslar und das EST das von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung geförderte Projekt „LiBattFire“ initiiert. Darin wird die Zielsetzung verfolgt, ausgehend von aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Entstehung von Batteriebränden eine standardisierte Wissensbasis aufzubauen und diese den Einsatzkräften zu vermitteln. Auf diese Weise sollen Gesundheitsrisiken sowie Umweltbelastungen durch kontaminierte Einsatzmittel und Einsatzorte minimiert werden. Das im Herbst 2025 gestartete Verbundprojekt „EWAZ-Trans-

fer“ hat das Ziel, ausgehend von den Ergebnissen der früheren Vorstudie zum „Energie- und Wasserspeicher Harz“ weiterführende Fragestellungen zu klären, die für eine spätere praktische Umsetzung durch Wirtschaftsunternehmen entscheidend sind. Unter der Leitung des EST arbeiten in diesem Vorhaben weitere neun Partner aus Forschung, Energie-, Wasser- und Versicherungswirtschaft zusammen.

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

Im Namen des Vorstandes

Dr. Jens-Peter Springmann

Administrativer Geschäftsführer EST

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 2024/2025

In den Jahren 2024 und 2025 verfügte das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien auf Basis der jährlich fortgeschriebenen Zielvereinbarung mit dem Präsidium über einen jährlichen Etat aus Haushaltsmitteln von ca. 1,5 Mio. € für Personal- und Sachkosten. Diese konnten in beiden Jahren jeweils durch budgetwirksame Drittmiteleinahmen im jeweiligen Jahr mindestens verdoppelt werden.

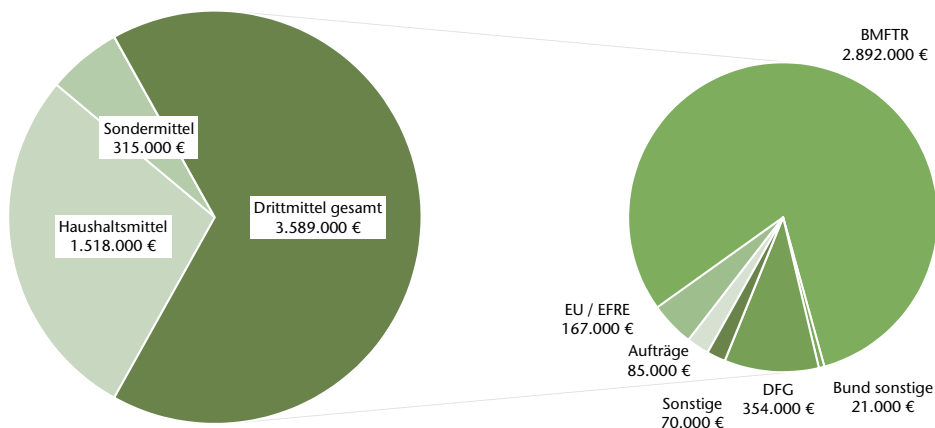
Ein wesentlicher Anteil ging auch im Jahr 2024 noch auf Fördermittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF, heute BMFTR) zurück, insbesondere für das Projekt „StaR – Stack Revolution“ im bundesweiten Leitprojekt „H2Giga“. Mit dem Auslaufen des Vorhabens war im Folgejahr ein deutlicher Rückgang der Drittmiteleinahmen verbunden. Dieses ist insbesondere auf die hohe Beteiligung von Arbeitsgruppen des EST am Niedersächsischen Verbundprojekt „TEN.efzn: Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ zurückzuführen, da hierdurch zeitweise wenig Ressourcen für Antragsstellungen in anderen Bereichen zur Verfügung standen. Der Ende 2024 gestartete „TEN.efzn“-Verbund wird im Gegenzug bis zum Jahr 2029 zu einem vergleichsweise hohen Niveau von Sondermittelerträgen am EST führen.

Im Berichtszeitraum ist auch der Anteil der Industrieaufträge, die bislang nahezu ausschließlich im Bereich der Batteriesicherheits-

forschung angesiedelt sind, deutlich gesunken. Dieser Befund hat seine Ursachen im Wesentlichen im relevanten Marktumfeld, welches aufgrund der politischen Diskussion um ein „weg vom Verbrenner-Aus“ von hohen Unsicherheiten geprägt war. Auch wurden von Seiten des Bundes zuvor geplante Ausschreibungen im Bereich der Batterieforschung zurückgestellt, so dass geplante Antragsaktivitäten nicht umgesetzt werden konnten. Ergänzend standen einzelne Testanlagen aufgrund anhaltender Störungen zeitweise nicht zur Verfügung, so dass Testanfragen nicht angenommen werden konnten. Seit der zweiten Jahreshälfte 2025 konnten hingegen zahlreiche neue Anträge für Mittel aus der Regional- und Bundesförderung platziert werden. Auch die Nachfrage nach Testkapazitäten für industrielle Auftraggeber zog wieder spürbar an, so dass ab dem Jahr 2026 wieder mit einer positiven Drittmittelentwicklung in diesem Bereich gerechnet werden kann. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Zusammensetzung der Jahresbudgets im Berichtszeitraum auf.

Der Personalbestand des EST war gegenüber den Vorjahren zunächst rückläufig, was insbesondere wieder im stellenweisen Einsatz von Personalmitteln aus der Grundfinanzierung für Infrastrukturinvestitionen (v.a. Projekt „H2-SeKo“) sowie der Finanzierung von Eigenprojekten begründet lag. Auch konnten Nachbesetzungen freigewordener Stellen nicht

Zusammensetzung des Gesamtbudgets 2024



Mitarbeiter:innen der EST-Geschäftsstelle 2024/2025:

Leitung



Dr. Jens-Peter Springmann
Administrativer Geschäftsführer

Verwaltung



Fee Strahler



Heike
Stucki-Bammel



Nico Rusack

Bibliothek



Nadine
Kleinander



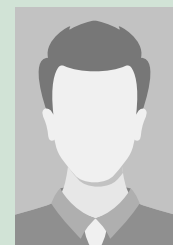
Britta Dethlefs



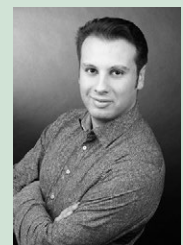
Kevin Maib



Wolfgang
Schrader



Fabian Arndt



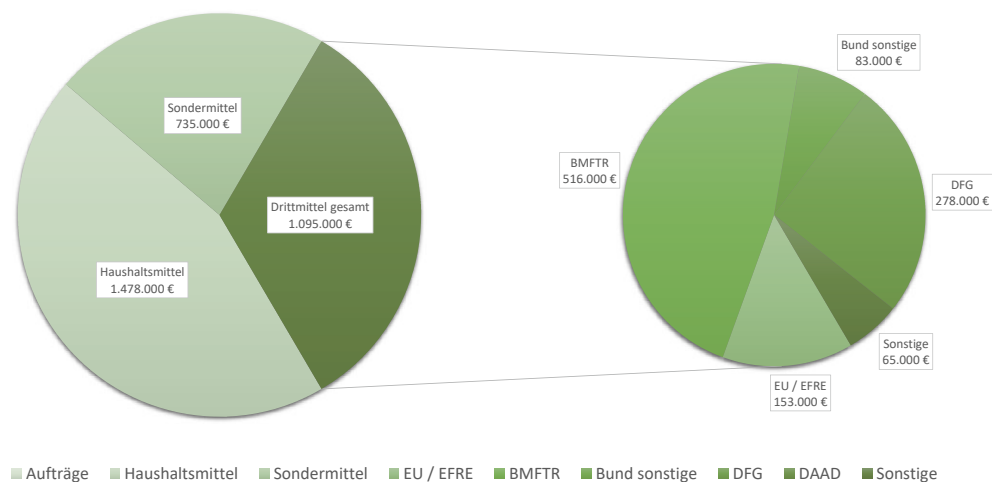
Florian Päckers

Technik

immer nahtlos erfolgen, was ebenfalls negativ in die Stellenstatistik einfließt. Für das Jahr 2024 weist das EST somit die Beschäftigung von insgesamt 32 Personen in Vollzeitäquivalenten aus, davon 25 Personen im wissenschaftlichen und 7 Personen im nicht-wissenschaftlichen Dienst. Bereits im Folgejahr konnten u.a. mit

der erfolgreichen Einwerbung des strategischen „TEN.efzn-Projekts“ zahlreiche neue Stellen besetzt werden, so dass im Jahresdurchschnitt 2025 bereits wieder 31 Personen im wissenschaftlichen Dienst und 6 Personen im nicht-wissenschaftlichen Dienst am EST beschäftigt waren.

Zusammensetzung des Gesamtbudgets 2025



[Anmerkung: 2025, vorläufig]





STRATEGIEBILDENDE FORSCHUNGSPROJEKTE IN DEN JAHREN 2024/2025

3.

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

Kurzfassung

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) können bei missbräuchlicher Behandlung oder Produktionsfehlern erhebliche Energiemengen freisetzen. Dies führt zur Entwicklung hoher Drücke und sehr hoher Temperaturen sowie der Freisetzung toxischer, explosionsfähiger und brennbarer Gase, dem sogenannten Thermal Runaway (TR). Durch sehr heiße Partikel, die mit dem Gasstrom aus dem Zelleninneren 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 austretenden Gase unter die sicherheitskritischen Schwellwerte sowie die Vermeidung einer Thermischen Propagation durch Verminderung der Wärmeerzeugungsrate der Zelle, 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.

Projektpartner

- BorgWarner Akasol AG, Darmstadt
- Teubert Maschinenbau GmbH, Blumberg
- UniverCell Holding GmbH, Flintbek

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 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 aufgrund 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 Zelleninneren 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.

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 Brandvermei-

dung: 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.

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, um TR zu verzögern
- 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 austretenden Gase unter Beachtung von Propagationsbarrieren durch Isolationsmaterial, verbesserte Wärmeleitung und/oder forcierte Kühlung

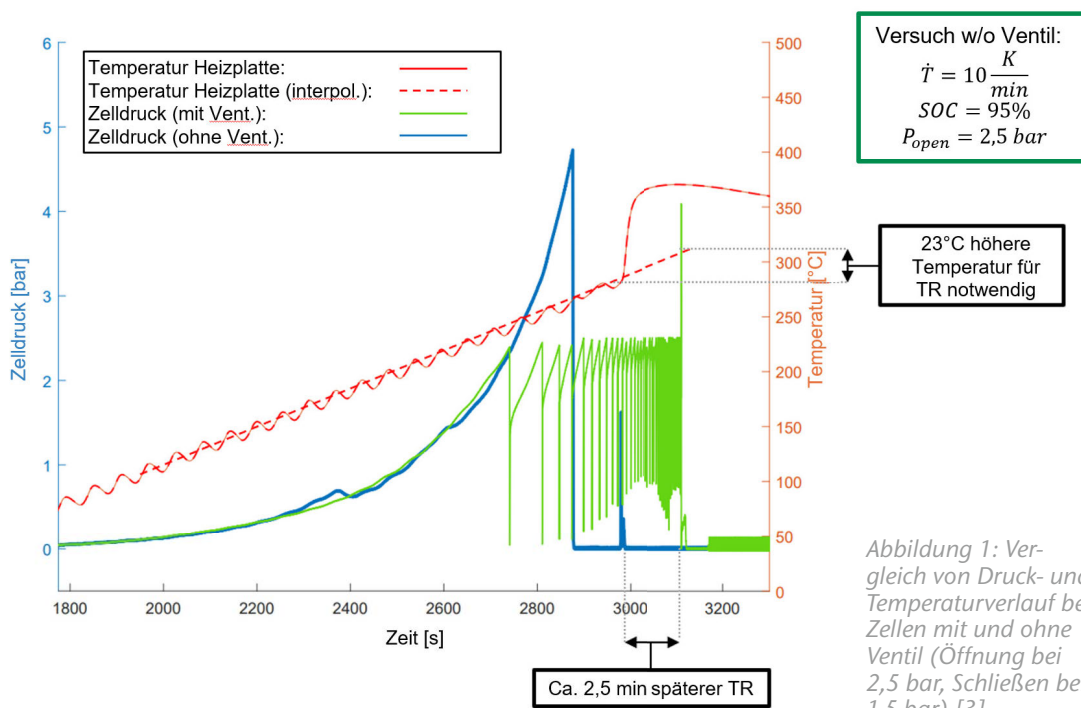


Abbildung 1: Vergleich von Druck- und Temperaturverlauf bei Zellen mit und ohne Ventil (Öffnung bei 2,5 bar, Schließen bei 1,5 bar) [3].

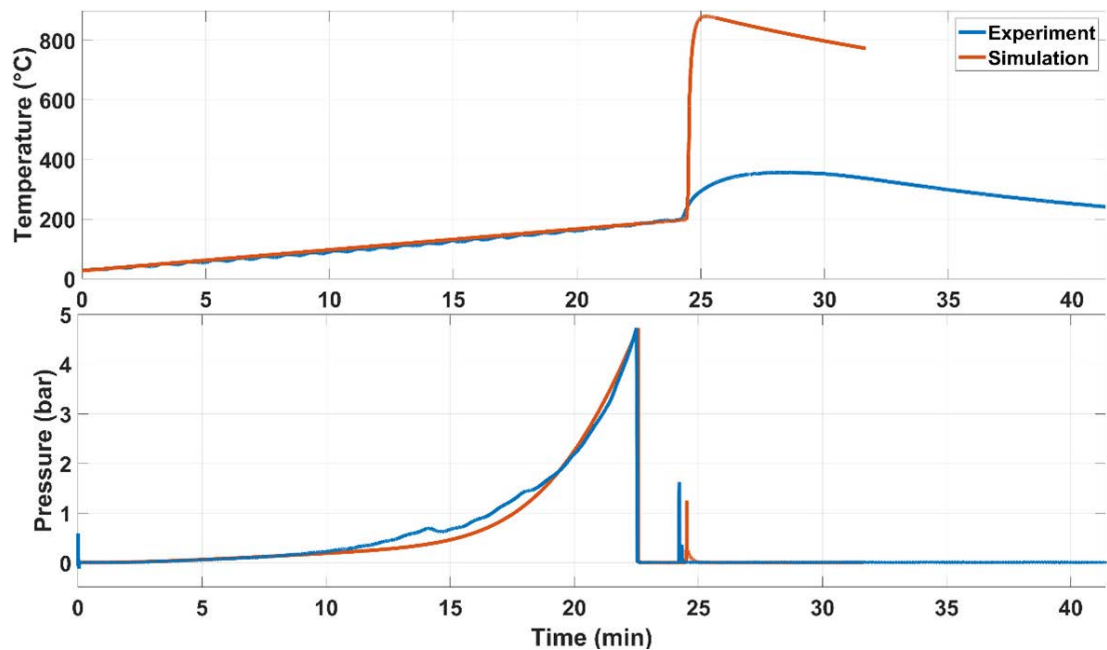


Abbildung 2: Vergleich des simulierten Temperatur- und Druckverlaufs mit den experimentellen Daten [3].

Experimentelle Umsetzung

Industrielle Zellen werden soweit manipuliert, dass ein internes Sicherheitselement gegen Überdruck deaktiviert wurde. Auf der Oberseite der Zellen befindet sich eine mit Epoxidharz 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. Während der gesamten Versuchsdauer wurde

die Zellspannung kontinuierlich erfasst. Die Auslösung des TR erfolgte durch unterschiedliche Heizraten von 1, 5 und 10 K/min mittels Heizplatte, die einseitig an der Zelle angebracht war. Die Beheizung wurde jeweils beendet, sobald die Zelle in den TR überging.

Projektstand

Die ersten Versuchsreihen wurden mit prismatischen NMC811-Zellen durchgeführt, die zur Druckmessung mit integrierten Drucksensoren modifiziert wurden. Die Zellen besitzen eine

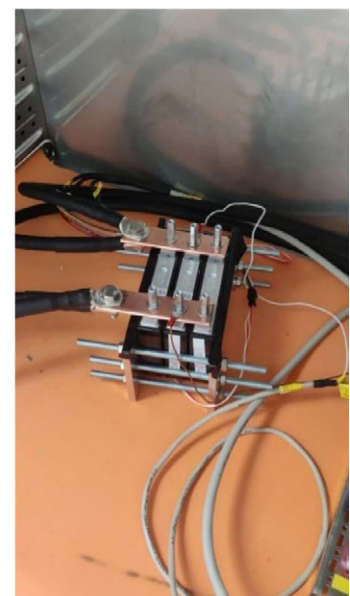
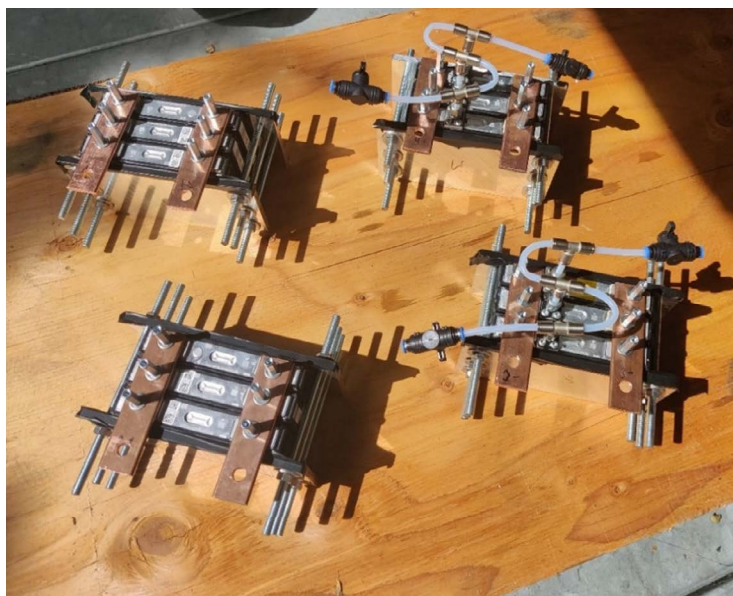


Abbildung 3: Vier Module in 1s3p-Konfiguration. Zwei mit Drucksensoren, zwei als Referenz.

Nennkapazität von 49,5 Ah und wurden einseitig mit einer konstanten Heizrate von 10 K/min beaufschlagt. Bei den Thermal-Runaway-Versuchen zeigte sich bei einem Ladezustand von 95 % SoC ein TR-Ereignis nach etwa 24 Minuten (vgl. Abbildung 2). Zu diesem Zeitpunkt betrug die Temperatur an der beheizten Zellseite rund 288 °C. Vor dem TR wurde in den Zellen eine exponentielle Druckzunahme beobachtet. Die mechanisch bedingte Zellöffnung (Venting) erfolgte dabei in einem Druckbereich von etwa 4,5 bis 5 bar. Während des TR-Ereignisses führte die rapide Gasfreisetzung in der Zelle zu einer sprunghaften Drucksteigerung, die mit Literaturdaten übereinstimmt.

Zur Untersuchung einer gezielten Druckentlastung wurde ein elektromagnetisch gesteuertes Ventil eingesetzt, das bei einem Zellinnen- druck von 2,5 bar öffnet und bei 1,5 bar wieder schließt (vgl. Abbildung 1). Durch das wiederholte Öffnen und Schließen des Ventils konnten die in der Zelle entstehenden Gase kontrolliert abgeführt werden, wodurch sowohl die Wärmeentwicklung als auch Druckspitzen reduziert wurden. Unter den untersuchten Bedingungen führte die aktive Ventilsteuerung zu einer Verzögerung des Thermal-Runaway-Ereignisses um etwa 2,5 Minuten. Der TR setzte dadurch erst bei einer rund 23 °C höheren Temperatur ein, was das Potenzial einer geregelten Frühentlastung zur Vermeidung von Havarien verdeutlicht.

Parallel zu den Experimenten wurde ein physikalisch-chemisches Modell, ursprünglich für NMC111 entwickelt und an die Eigenschaften von NMC811 angepasst, zur Auswertung herangezogen. Das Modell reproduziert die zeitlichen Verläufe von Temperatur und Druck sehr gut und erlaubt eine klare Zuordnung der Gas- und Wärmeproduktion zu den einzelnen Zersetzungsprozessen in der Zelle. Insbesondere zeigt die Simulation, dass die anfängliche Druckentwicklung bis etwa 80 °C überwiegend durch Verdampfung des Elektrolyten verursacht wird, während oberhalb dieser Temperaturen die Zersetzung von SEI/CEI, Elektrolyt, Anode, Kathode und Binder die dominante Gas- und Wärmeentwicklung trägt. Aus den modellierten Wärmeleistungs- und Energiekurven lassen sich so gezielt die Reaktionen identifizieren, die überproportional zur Gesamtwärmeentwicklung beitragen und damit als Ansatzpunkte für Zelloptimierungen dienen.

Die Lebensdauerversuche begannen mit Vorversuchen an Einzelzellen, die bei 45 °C und einer Stromrate von 2C durchgeführt wurden.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

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

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Förderkennzeichen:

03XP0535A

Laufzeit des Vorhabens:

01.05.2023 – 30.04.2026

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

Projektbearbeiter:

Timo Reichrath, M.Sc.
Mohammad Ayada, M.Sc.

Projektpartner:

BorgWarner Akasol AG, Darmstadt
Teubert Maschinenbau GmbH, Blumberg
Frötek Kunststofftechnik GmbH, Osterode a.H.



Ralf Bengler



Timo Reichrath



Mohammad Ayada

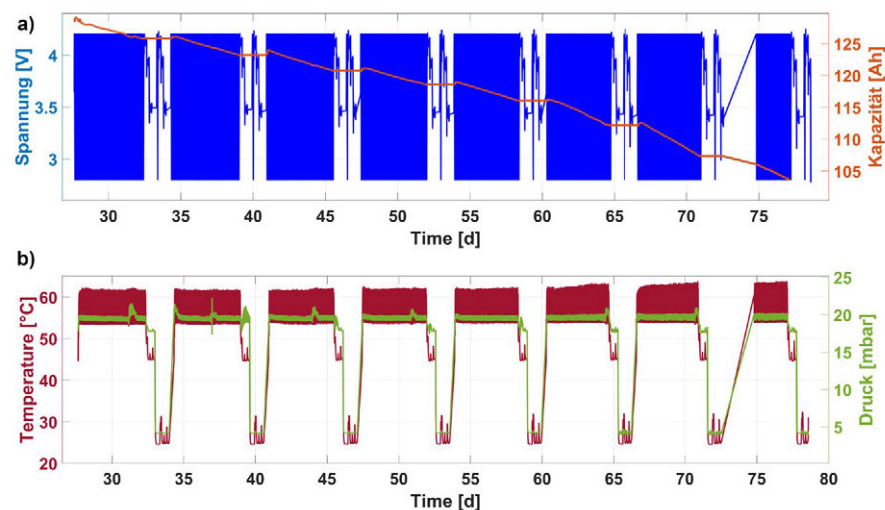


Abbildung 4: Alterungsversuch des modifizierten Zellmoduls (400–1.200 Zyklen): a) Spannung und Kapazitätsdegradation b) Temperatur und Druck.

Neben der zyklischen Belastung wurden dabei EIS-Messungen bei Ladezuständen von 95 %, 80 % und 50 % SoC durchgeführt. In diesem Vorversuch erreichte die Zelle nach 300 Zyklen einen State of Health (SOH) von etwa 80 %. Die vergleichsweise schnelle Degradation lässt sich durch die hohen Temperatur- und Strombelastungen sowie durch die verwendete Zellchemie erklären. Während der zyklischen Belastung wurden im Zellinneren typische, reversible Druckschwankungen von etwa ± 6 mbar während der Lade- und Entladevorgänge beobachtet. Temperaturbedingte Druckänderungen beim Wechsel zwischen 25 °C und 45 °C führten zu einem Druckanstieg von etwa 4,2 mbar auf 18,4 mbar. Ein dauerhaft zunehmender Zellinnendruck wurde im Verlauf der Alterung jedoch nicht festgestellt. Der Innenwiderstand der Zelle erhöhte sich im Verlauf der Zyklen deutlich – von anfänglich etwa 0,75 mΩ auf rund 1,0 bis 1,1 mΩ nach 300 Zyklen.

Auf Basis der Vorversuche wurden vier Module in 1s3p-Konfiguration (jeweils drei parallel geschaltete Zellen à 49,5 Ah; gesamt 148,5 Ah) aufgebaut (vgl. Abbildung 3). Zwei der Module wurden mit Drucksensoren ausgestattet, während zwei weitere als Referenzmodule ohne Sensoren geführt wurden. Die Referenzmodule dienen dazu, zu bestätigen, dass die Integration der Drucksensoren keinen Einfluss auf die Kapazität oder die Stabilität der Module hat.

Vor Beginn der Tests wurden die Module charakterisiert, um die während der Alterung erfassten Messdaten später vergleichen zu können. Die Module wurden bei einer Tem-

peratur von 45 °C mit einer Stromrate von 2C (entsprechend 300 A) zyklisiert, um die Alterung zu beschleunigen. Nach jeweils 100 Zyklen erfolgte eine erneute Charakterisierung der Module. Diese wurde jeweils bei 25 °C und 45 °C durchgeführt. Nach etwa 1.500 Zyklen (entsprechend rund 116 Betriebstagen) lag der State of Health (SOH) der Module bei ungefähr 67 %. Die gemessene Modulkapazität verringerte sich in diesem Zeitraum von 148,5 Ah auf etwa 100 Ah. Parallel dazu wurde ein moderater Temperaturanstieg des Moduls um etwa 3 °C beobachtet. Ein zunehmender Zellinnendruck wurde im Verlauf der Alterung jedoch nicht festgestellt. Die Alterungsversuche wurden mit weiteren Zellmodulen wiederholt, um die Ergebnisse zu bestätigen.

Literatur

- [1] J. Klink und e. al., „Comparison of Model-Based and Sensor-Based Detection of Thermal Runaway in Li-Ion Battery Modules for Automotive Application“, *Batteries*, 7 4 2022.
- [2] M. M. E. H. Ali und M. Ghodrati, „Thermal and combustion characteristics of vent gases from lithium-ion battery thermal runaway: a comprehensive review“, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 13925-13952, 19 August 2025.
- [3] M. Ayayda, R. Benger, T. Reichrath, K. Kshittij, J. Klink und I. Hauer, „Modeling Thermal Runaway Mechanisms and Pressure Dynamics in Prismatic Lithium-Ion Batteries“, *Batteries*, 04 12 2024.

INNOBATT: Eine Batterie vom Material bis zum System neu denken – ressourcenschonend, leistungstark, innovativ

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Verbreitung batteriebetriebener Anwendungen steigt die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen und der Bedarf an alternativen Speichertechnologien zu konventionellen Lithiumbatterien. Gleichzeitig stellen neue Einsatzfelder wie die Netzstabilisierung Anforderungen an hohe Leistungen und weniger an die Energiedichte. Die innovative Aluminium-Ionen-Batterie (AIB) auf Basis von umweltfreundlichen, gut verfügbaren Materialien mit hoher Leistung und Zyklenfestigkeit stellt daher eine vielversprechende Technologie für diese Ansprüche dar. In einem Vorprojekt am EST konnten diese Eigenschaften bereits experimentell bestätigt werden (GridBatt, siehe Jahresbericht 2022/23).

Im Projekt INNOBATT wurden diese Vorergebnisse weiter optimiert und in kleinformatige Pouch-Zellen skaliert, um mit einem Demonstratorsystem die Anwendbarkeit der AIB zu diesem frühen Entwicklungsstand unter Beweis zu stellen. Neben der Zellchemie wurde mit einem quantenbasierten Stromsensor und drahtloser BMS Kommunikation auch weitere Komponenten modifiziert und neu gedacht. Entgegen gängiger Praxis wurde das Recycling am Lebensdauerende bereits von Anfang an in Designentscheidungen berücksichtigt, um eine vollständige Rückführbarkeit der Rohstoffe zu erleichtern.

Am EST wurden die entwickelten AIB-Pouchzellen elektrochemisch charakterisiert und so Einblicke in das Potential sowie Ursachen für Stabilitätsprobleme gegeben, um die Entwicklung und Skalierung zu unterstützen. Zusätzlich erfolgte der Demonstratorentwurf, -aufbau und Validierung des Gesamtsystems ebenfalls am EST.

Summary

With the increasing prevalence of battery-powered applications, dependence on critical raw materials and the need for alternative storage technologies to conventional lithium batteries is growing. At the same time, new areas of application such as grid stabilisation place

demands on high performance rather than energy density. The innovative aluminium-ion battery (AIB), based on environmentally friendly, readily available materials and offering high performance and cycle stability, represents a promising technology. These properties have already been experimentally confirmed in a preliminary project at EST (cf. GridBatt, Jahresbericht EST 2022/23).

In the INNOBATT project, these preliminary results were further optimised and scaled down to smallformat pouch cells in order to demonstrate the applicability of the AIB at this early stage of development using a demonstrator system. In addition to the cell chemistry, other components were also modified and redesigned, including a quantum-based current sensor and wireless BMS communication. Contrary to common practice, end-of-life recycling was taken into account in design decisions from the outset in order to facilitate complete traceability of raw materials.

At EST, the developed AIB pouch cells were electrochemically characterised, providing insights into their potential and the causes of stability problems in order to support development and scaling. In addition, the demonstrator design, construction and validation of the overall system were also carried out at EST.

Hintergrund

Die Entwicklung nachhaltiger Energiespeicherlösungen gewinnt angesichts der begrenzten und teils kritischen Rohstoffverfügbarkeit zunehmend an Bedeutung. Während klassische

Projektpartner

- Fraunhofer IISB THM, Freiberg
- Fraunhofer IISB; Erlangen
- TU Clausthal, EST
- FAU Erlangen, AQuT.
- ACCUREC Recycling GmbH
- HIMA Paul Hildebrandt GmbH

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) einen wichtigen Beitrag zur Elektromobilität und stationären Energiespeicherung leisten, wächst der Bedarf an alternativen Batterietechnologien, die auf leichter verfügbaren, umweltfreundlichen Materialien basieren und zugleich Leistungsanforderungen moderner Anwendungen adressieren.

Eine vielversprechende Option ist die Aluminium-Ionen-Batterie (AIB), die im Labormaßstab bereits durch ihr hohes Leistungspotential auf sich aufmerksam machen konnte. [1], [2] Aufbauend auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojekts GridBatt [3], in dem erstmals AIB-Laborzellen erfolgreich zu kleinen Pouchzellen skaliert wurden, setzt das Projekt INNOBATT die Entwicklung und Skalierung konsequent in Richtung eines Demonstratormoduls fort. Dabei werden nicht nur klassische Ansätze der Zellchemie weiterentwickelt, sondern auch etablierte Batteriesystemkonzepte grundlegend neu gedacht. Insbesondere standen das von Anfang an mitgedachte Recycling sowie der Einsatz innovativer Technologien wie quantenbasierte Strommessung und drahtlose BMS-Kommunikation im Vordergrund.

Die AIB-Technologie befindet sich noch im frühen Entwicklungsstadium, so dass bisherige Untersuchungen vor allem aus elektrochemischer und materialtechnischer Sicht erfolgten. Dies erschwert jedoch die Bewertung der AIB im Kontext realer Anwendungen und vergleich-

barer Technologien. Das EST bringt fundierte Erfahrung in der Anwendung und Charakterisierung von Batterietechnologien ein und übernimmt im Projekt die Aufgabe, die AIB mit anwendungsnah angepassten Methoden unter praxisrelevanten Bedingungen umfassend zu bewerten. Die Messungen an innovativen, kleinformatigen AIB-Pouchzellen (>20 mAh) im Gegensatz zu Labor- und Knopfzellen stellen dabei ein Novum dar und ermöglichen erstmals eine detaillierte Analyse dieser Zellgröße hinsichtlich Temperatur- und Ladezustandsabhängigkeiten sowie zyklischer Belastbarkeit.

Projektstand

Das Förderprojekt INNOBATT ist am 31.10.2025 plangemäß nach insgesamt drei Jahren Projektlaufzeit abgeschlossen worden. Sowohl die gesetzten Meilensteine als auch Projektziele konnten vollständig erfüllt werden, so dass zum Abschlusstreffen der in Abbildung 1 dargestellte funktionstüchtige Demonstrator inkl. Peripherie als gemeinsames Projektergebnis präsentiert werden konnte.

Aufbauend auf dem erfolgreichen Projektabschluss wird die konstruktive und enge Kooperation mit dem Fraunhofer IISB THM und der dortigen AIB-Pouchzellproduktion in dem Nachfolgeprojekt SALSA (s. Seite 65) weiter vertieft und die Arbeiten an der AIB inhaltlich fortgeführt.

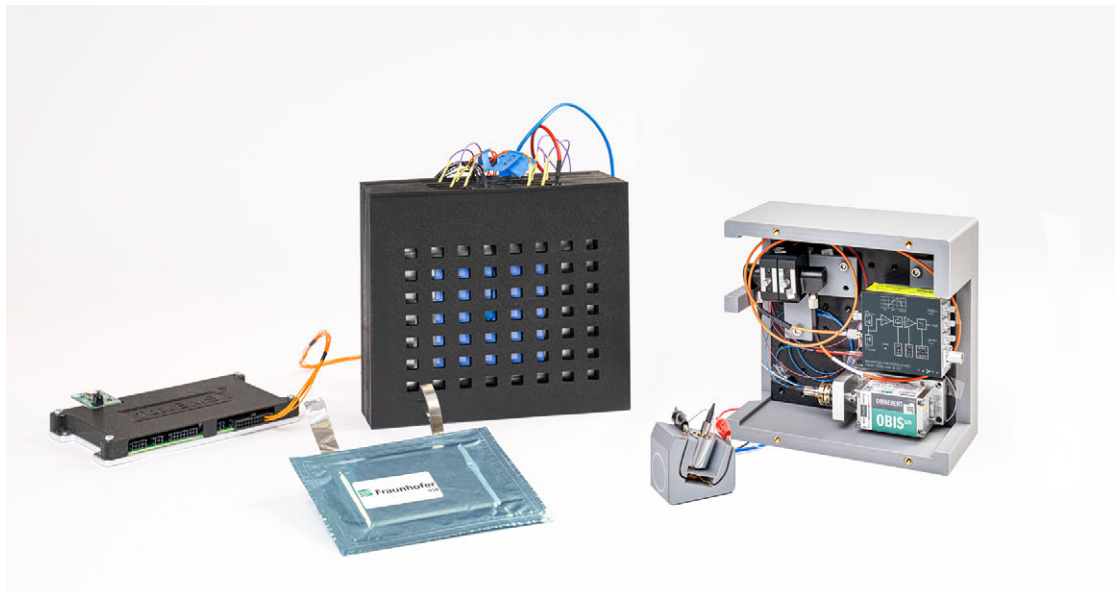


Abbildung 1: Gesamtdemonstratorsystem, v.l.n.r. Sub-BMS, AIB-Pouchzelle, AIB-Modul, Quantensensorkopf & Backend.

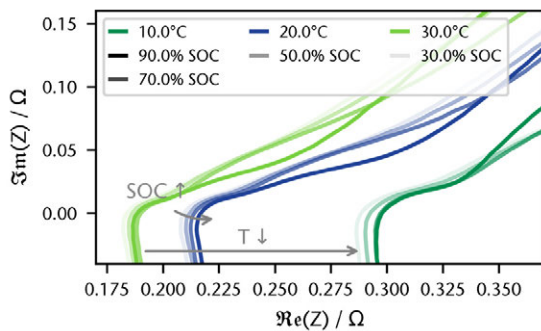


Abbildung 2: Impedanzspektren der AIB-Pouchzelle bei Variation von Ladezustand (SOC) und Temperatur.

Ergebnisse

Kernbestandteil des Projekts waren die vom Projektpartner Fraunhofer IISB gefertigten AIB-Pouchzellen, welche über die Projektlaufzeit von anfänglich 25 mAh und hohen Ausfallraten zu 75 mAh und hoher Zuverlässigkeit verbessert wurden. Der Formfaktor der Zellen sowie der interne Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

Eine Herausforderung zu Projektbeginn bestand in der Ursachensuche für eine hohe Varianz der erzielten Zelleigenschaften sowie plötzlicher Zellausfälle im Besonderen nach dem Versand ans EST. Da die strukturelle Analyse von Faktoren des Transportwegs ohne Ergebnis blieb, wurde eine Befundung unter Inertgas vorgenommen, wie in Abbildung 3 dargestellt. Aus der Struktur des Separators ließ sich auf inhomogene Kontaktierung infolge von Gasbildung schließen und mit Verspannung der Zellen eine wirksame Gegenmaßnahme identifizieren.

Mit dieser Erkenntnis konnten hinreichend große Stichproben der eigentlichen elektrochemischen Charakterisierung zugeführt werden.

Da ein umfangreiches Review der bestehenden Forschung im Wesentlichen Analysen bei konstanten Temperaturen identifizieren konnte, wurden die Messungen vorwiegend bei variabler Umgebungstemperatur durchgeführt.

In Abbildung 2 sind exemplarisch für diese Charakterisierungskampagne die Impedanzspektren bei Variation von Ladezustand und Temperatur dargestellt. Die zu erwartende Verringerung der Impedanz mit steigender Temperatur ist gut zu erkennen und unterstreicht die Notwendigkeit der Charakterisierung unter kontrollierten Umgebungsbedingungen. Außerdem sollte ein Temperaturscreening bereits frühzeitig in der Entwicklung integriert werden, um eine Verfälschung der Ergebnisse aufgrund übermäßiger Temperaturabhängigkeit zu vermeiden.

Auf Basis zusätzlicher Charakterisierungen konnte ein empirisches temperaturabhängiges Modell der AIB aufgebaut und erfolgreich mit dynamischer Last validiert werden.

Eine Herausforderung der AIB besteht in der häufig benannten hohen Selbstentladungsrate. Da die Skalierung von publizierten Knopf- und Laborzellenergebnissen auf größere Zellen nur eingeschränkt möglich ist, wurde diese Eigenschaft ebenfalls messtechnisch erfasst. Zur Verkürzung der Messdauer wurde hierbei abweichend von der Literatur die Erhaltungsladung anstelle der entnehmbaren Restkapazität betrachtet. Mit diesem Ansatz ist zudem eine Aussage über die Entladerate in Abhängigkeit des Ladezustands einfacher zu realisieren.

In Abbildung 4 sind die so ermittelten Ströme dargestellt, welche mit den Ergebnissen aus Restkapazitätsmessungen übereinstimmt. Wie zuvor, zeigt sich auch hier eine starke Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Vorteilhaft

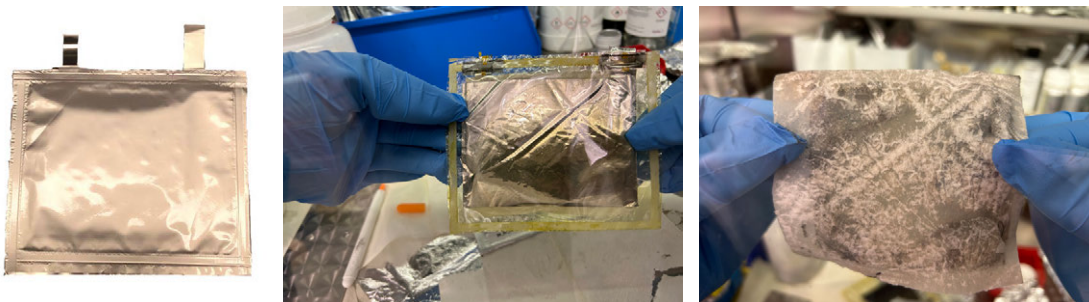


Abbildung 3: Exemplarische Zellöffnung zur Fehlersuche, v.l.n.r. AIB-Pouchzelle, innerer Elektrodenstapel, Separatorvlies.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

INNOBATT: Eine Batterie vom Material bis zum System neu denken – ressourcenschonend, leistungstark, innovativ

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)

Förderkennzeichen:

03XP0492C

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2022 – 31.10.2025

Projektleiter:

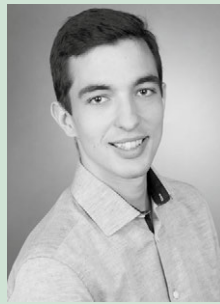
Dr.-Ing. Ralf Bengner

Projektbearbeiter:

Jacob Klink, M.Sc.



Ralf Bengner



Jacob Klink

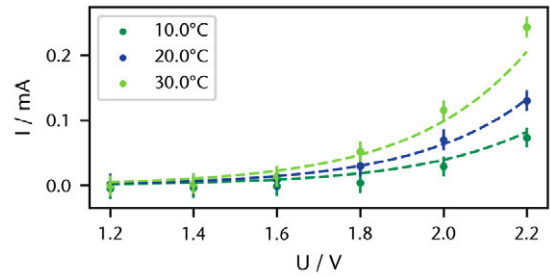


Abbildung 4: Temperaturabhängiger Erhaltungsladungsstrom (24h) einer 75mAh AIB Zelle bei verschiedenen Ladezuständen bzw. Leerlaufspannungen.

aus Anwendungssicht ist hierbei, dass durch die abklingende Aktivität keine Tiefenentladung der Zellen zu erwarten ist. Der obere Spannungsbereich ist für das Erreichen guter Kapazitätswerte erforderlich, so dass die weitere Untersuchung und Optimierung der Nebenreaktionen in diesem Betriebsbereich notwendig ist.

Neben der detaillierten Beschreibung der AIB-Eigenschaften diente die Charakterisierung der Pouchzellen der Auswahl von acht näherungsweise identischen Zellen, um die Zwischenzellvarianz (CtCV, [4]) des Moduls zu minimieren und die Gesamtperformance nicht durch die schwächste Zelle im Verbund zu beschränken.

Für das Modul wurde eine 4s2p-Konfiguration gewählt, um sowohl die Effekte von Parallel- als auch Reihenverschaltung untersuchen zu können. Unter Berücksichtigung des Recyclingaspekts wurde ein modularer verschraubter Ansatz verfolgt, wie in Abbildung 5 dargestellt ist.

Mit dem integrierten Sub-BMS werden die Spannung und Temperatur auf Zelllevel überwacht, während das Modul durch einen Prüfstand anwendungsnah mit einem Lastprofil zur synthetischen Nachbildung von Momentanreserve belastet wird. Charakteristisch für diese

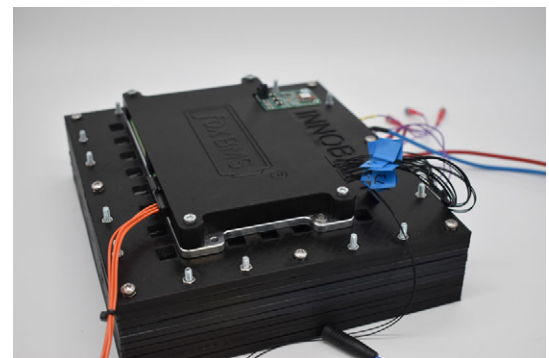


Abbildung 5: Demonstratormodul mit drahtlosem Sub-BMS.

Anwendung ist die permanente hochdynamische Belastung ohne jegliche Standzeiten, mit schnellen Lastwechseln und näherungsweise ladungsneutraler Bilanz – konträr zur Kapazitäts- und Entladeoptimierung von LIB.

In dem gewählten Lastfall wurden die Zellen so mit bis zu 15C belastet, was einer Vollladung in 4 min entspräche.

Im Verlauf der mehrstündigen Belastung sind keine Auffälligkeiten bei den Zellen oder der angebundenen Peripherie zu beobachten gewesen. Darüber hinaus konnten keine Abweichungen der BMS-Messwerte festgestellt werden, so dass der Demonstrator in seiner Funktionalität vollständig validiert werden konnte.

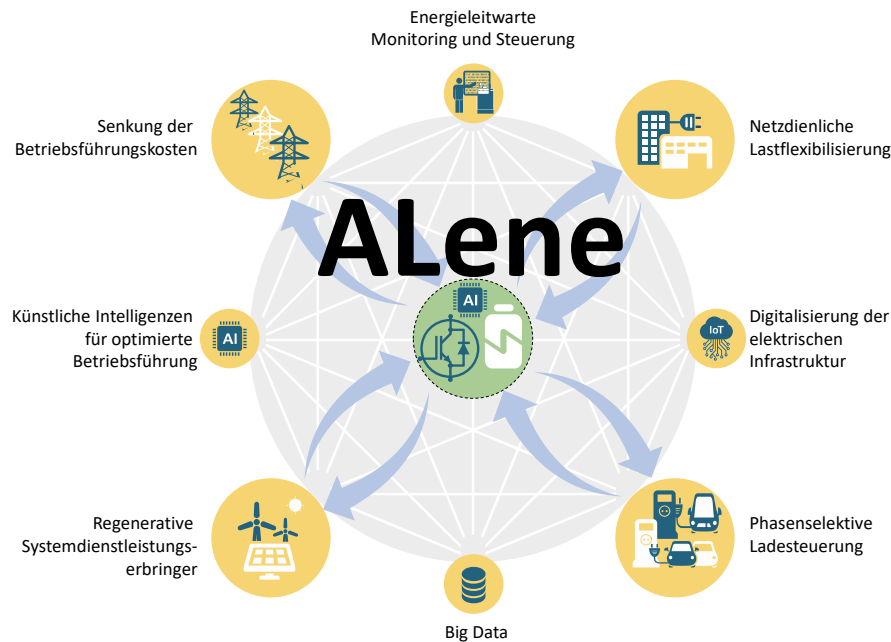
Das Projekt stellt somit unter Beweis, dass der Betrieb der AIB bereits außerhalb von Laborbedingungen und mit fordernden Belastungen über längeren Zeitraum möglich ist. Mit Hilfe der Charakterisierung konnte die AIB im Technologievergleich als starker Leistungsspeicher klassifiziert werden, was sie für Netzanwendungen (s.o.) prädestiniert. Die langjährige Erfahrung des EST mit Energiespeichern erwies sich dabei als besonders wertvoll für die Lösung der

Herausforderungen beim Upscaling, da mit der Charakterisierung und Zellöffnung hilfreiche Einblicke in das Zellinnere gewonnen werden konnten.

Literatur

- [1] G. A. Elia, N. A. Kyeremateng, K. Marquard, und R. Hahn, „An Aluminum/Graphite Battery with Ultra-High Rate Capability“, *Batter. Supercaps*, Jan. 2018, doi: 10.1002/batt.201800114.
- [2] F. Jach u. a., „A Low-Cost Al-Graphite Battery with Urea and Acetamide-Based Electrolytes“, *ChemElectroChem*, Bd. 8, Nr. 11, S. 1988–1992, Jan. 2021, doi: 10.1002/celec.202100183.
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG & FORSCHUNG, „GridBatt – Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs“. FKZ: 03XP0307.
- [4] D. Beck, P. Dechent, M. Junker, D. U. Sauer, und M. Dubarry, „Inhomogeneities and Cell-to-Cell Variations in Lithium-Ion Batteries, a Review“, *Energies*, Bd. 14, Nr. 11, S. 3276, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14113276.

ALene: Intelligente Algorithmen und Leistungselektronik für einen netzqualitäts- und energieeffizienten Batteriespeicherbetrieb



Kurzfassung

Der Umbruch in der Energieversorgung, weg von zentralen konventionellen Großkraftwerken hin zu dezentralen volatilen regenerativen Kleinkraftwerken, sowie der wachsende Anteil von leistungselektronischen Betriebsmitteln beeinflussen die Sicherstellung von Qualität und Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung. Die negativen Effekte (Verzerrungsblindleistung, Oberschwingungsbelastung, Netzresonanzen, Phasenunsymmetrie, Span-

nungsbandverletzung, Frequenzschwankungen, etc.) und deren Auswirkungen (Betriebsmittelüberlastung, erhöhte Betriebskosten, etc.) stellen eine enorme Herausforderung für Netzbetreiber, Energieversorger und Verbraucher dar (Abbildung 1).

Eine Schlüsselrolle stellen diesbezüglich vor allem leistungselektronische Systeme, die vermehrt auch erweiterte Systemdienstleistungen bereitstellen können, dar. Damit durch solche erweiterten Maßnahmen die bestehenden Netzübertragungskapazitäten optimal genutzt und Kosten für den Netzausbau minimiert werden können, ist der operative Zusammenschluss unterschiedlicher Verantwortungsbereiche zwingend notwendig.

Dies erfordert eine intelligente Koordination und einen umfangreichen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Akteuren, wie den Netzbetreibern, den Energieversorgern und zukünftig verstärkt auch den Verbrauchern bzw. Prosumenten (Erzeuger und Verbraucher). Vor allem die großräumige Einbindung flexibler Lasten oder Speichersysteme, wie sie in Ladeinfrastrukturen oder Batteriespeichersystemen zur Anwendung kommen, birgt großes Potenzial zur Umsetzung solcher netzdienlichen Betriebs-

Projektforschungsstellen und Verbundpartner

- Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)
- TESVOLT AG (TV)
- Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH (PI)
- morEnergy GmbH (mE)
- Technische Universität Clausthal (TUC)
- Hochschule Magdeburg Stendal (H2)
- Harz Energie Netz GmbH (HE)

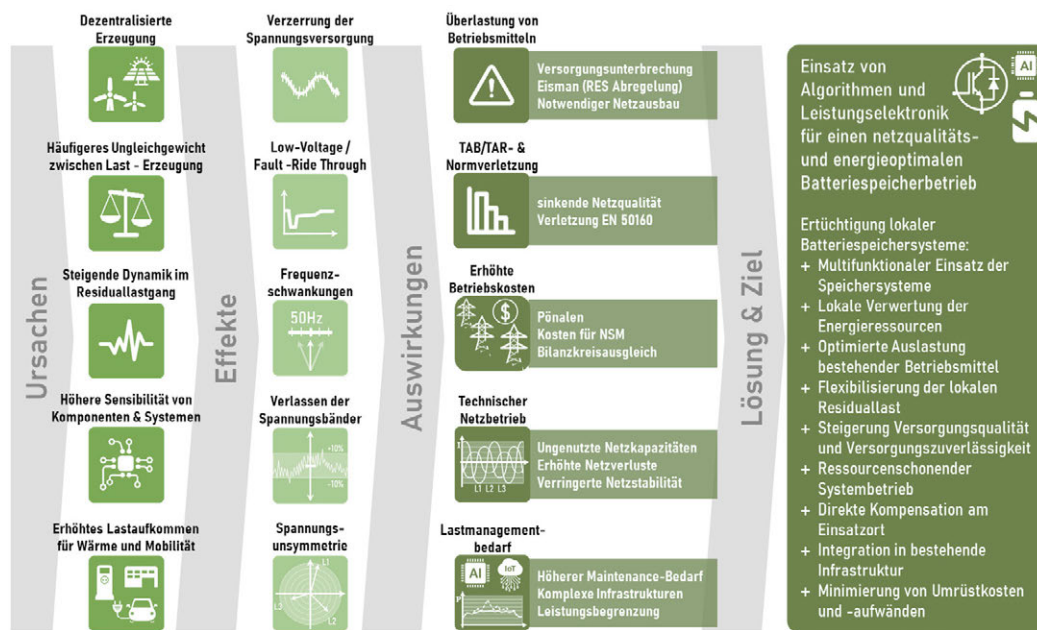


Abbildung 1: Bedarf und Motivation für ALene.

weisen. Um diese Potenziale heben zu können, müssen übergeordnete intelligente Energiemanagementsysteme mit entsprechender IKT (Informations- und Kommunikationstechnik) zum Einsatz kommen. Darüber hinaus bedarf es spezifischer Eigenschaften der Leistungselektronik, die sich über Schaltungstopologie sowie Regelungs- und Steuerungsverfahren definieren.

Summary

ALene focuses on the development and practical validation of algorithms and power electronics systems for optimized grid-serving and multifunctional operation of battery storage systems. The consortium's ambition includes the reduction and compensation of negative network influence variables and local network

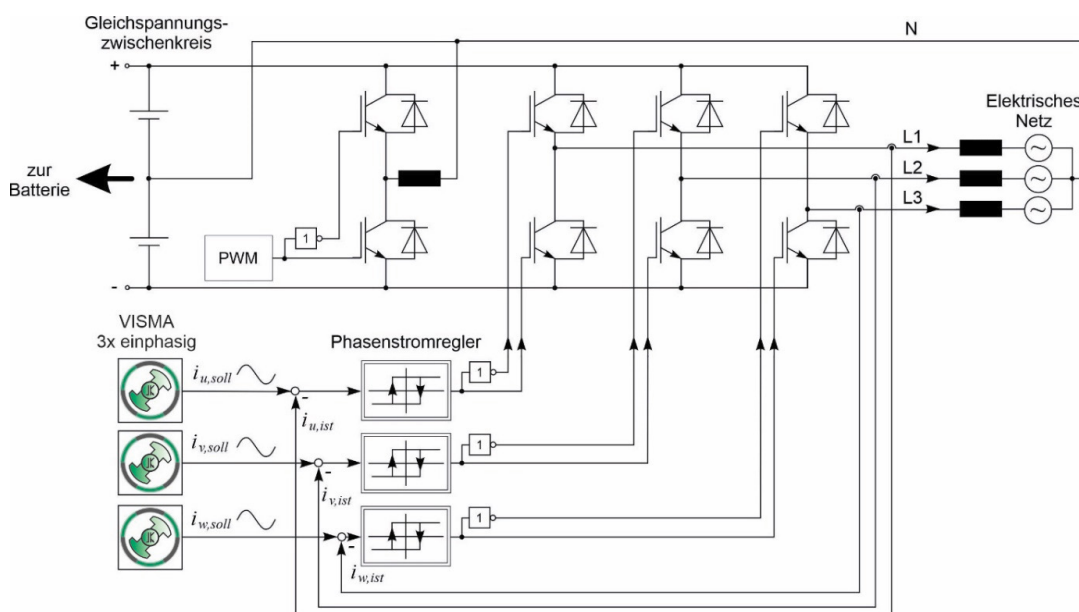


Abbildung 2: Strukturbild der VISMA+ mit einem möglichen Steuerungskonzept und dem vierten Brücken-zweig.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

ALene: Intelligente Algorithmen und Leistungselektronik für einen netzqualitäts- und energieeffizienten Batteriespeicherbetrieb

Fördermittelgeber:

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Förderbekanntmachung »Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung« im 8. Energieforschungsprogramm »Innovationen für die Energiewende«.

Förderkennzeichen:

03EI4084E

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2024 – 30.09.2027

Projektleiterin Teilprojekt EST:

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer

Projektbearbeiter:

Dr.-Ing. Ralf Hesse

Projektpartner:

Fraunhofer IFF, Magdeburg
TESVOLT AG, Lutherstadt Wittenberg
Harz Energie Netz GmbH,
Osterode am Harz
Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH, Achim
morEnergy GmbH, Hamburg
Hochschule Magdeburg Stendal,
Magdeburg



Ines Hauer

phenomena in order to increase the quality of supply, to relieve the load on operating resources, to make optimal use of existing network infrastructures and thus to increase the overall system efficiency in local distribution networks.

Gesamtziel des Teilvorhabens am EST

Im Fokus von ALene steht die Entwicklung und praktische Validierung von Algorithmen und Leistungselektroniksystemen für eine optimierte netzdienliche und multifunktionale Betriebsführung von Batteriespeichersystemen. Zum Anspruch des Konsortiums gehören die Reduktion und Kompensation von negativen Netzeinflussgrößen und lokalen Netzphänomenen zur Steigerung der Versorgungsqualität, zur Entlastung von Betriebsmitteln, zur optimalen Ausnutzung bestehender Netzinfrastrukturen und damit zur Steigerung der Gesamtsystemeffizienz in lokalen Verteilnetzen.

Das Teilvorhaben „Netzdienliche Regel- und Steuerverfahren für 4-Zweige-Wechselrichter – Untersuchung verschiedener Konzepte zunächst in der Simulation, Erarbeitung einer Soft- und Hardwarelösung und Überprüfung der Robustheit in enger Zusammenarbeit mit den Industriepartnern“ widmet sich der Realisierung und Implementierung eines völlig neuartigen Umrichterkonzeptes für den unsymmetrischen Betrieb. Der klassische Drei-Zweige-Umrichter (B6-Schaltung) wird durch einen vierten Zweig ergänzt (Abbildung 2). Durch Einführung dieses vierten Zweiges ist es bei unsymmetrischer Einspeisung nicht mehr notwendig, den Mittelpunkt des batterie-seitigen Zwischenkreises herauszuführen. Alle für den Betrieb notwendigen Verbindungen werden innerhalb der leistungselektronischen Endstufe bereitgestellt. Jede Phase wird unabhängig angesteuert. Es wird erstmals der am Institut entwickelte und zum Patent angemeldete VISMA-Regelalgorithmus dreimal einphasig für den unsymmetrischen Betrieb implementiert (im Folgenden VISMA+ genannt). In enger Zusammenarbeit mit Power Innovation Stromversorgungstechnik GmbH wird zunächst ein Prototyp auf IGBT-Basis getestet und in einem nächsten Schritt werden mehrere Versuchsträger auf der Basis neuartiger Silicon Carbide MOSFETs aufgebaut. Die entwickelten Regel- und Steueralgorithmen werden dann in einem eigenen Experimental-labor in der Forschungseinrichtung auf ihre Funktionalität, Robustheit und Zuverlässigkeit getestet. Hierfür steht eine Netznachbildung

zur Verfügung, mit der mögliche Netzfehler nachgebildet werden können. Es sind weiterführende netzdienliche Services in deutlich höherer Qualität und Dynamik möglich, so dass durch die Entwicklungen phasenselektive Verzerrungsblindleistung, Spannungshaltung, Blindleistungsbereitstellung, dynamische Leis-

tungsregelung sowie die VISMA-Funktionalitäten (Bereitstellung von Momentanreserve, Dämpfung von Netzpendelungen) abgebildet werden können. In einem Netzabschnitt der Harz Energie Netzgesellschaft wird ein Versuchsträger messtechnisch begleitet und unter realen Bedingungen getestet und bewertet.

H2-SEKO: Integration von grünem Wasserstoff in sektorengekoppelte Energiesysteme

Kurzfassung

Das Projekt H2-SEKO widmet sich dem Aufbau einer innovativen Forschungsinfrastruktur zur sektorenübergreifenden Integration von grünem Wasserstoff am EST. Ziel ist die Entwicklung und Erprobung intelligenter Komponenten und Betriebsstrategien zur kombinierten Nutzung elektrischer, stofflicher und thermischer Energieflüsse unter realen Betriebsbedingungen. Dabei werden eine großtechnische Photovoltaikanlage, ein alkalischer Wasserelektrolyseur, ein Wasserstoffspeicher, ein Wasserstoff-Blockheizkraftwerk sowie eine Luftwärmepumpe in ein bereits bestehendes Energieverbundsystem des EST (s. Abbildung 1) integriert. Das Testfeld bietet eine einmalige Reallaborumgebung mit praxisnahen Freiheitsgraden, die sowohl die Erforschung von Systemdynamik und Netzstabilität als auch die Entwicklung digitaler Steuerungs- und Optimierungskonzepte ermöglicht. Das Projekt verfolgt interdisziplinäre wissenschaftliche Fragestellungen aus den Bereichen der Elektrotechnik, der Verfahrenstechnik, Informations- und Regelungstechnik sowie Wirt-

schaftswissenschaften. Die Infrastruktur fördert die Ausbildung von Studierenden und schafft eine Basis für zukünftige Forschungsk Kooperationen.

Summary

The H2-SEKO project is dedicated to establishing an innovative research infrastructure for the cross-sectoral integration of green hydrogen at the EST. The goal is to develop and test intelligent components and operational strategies for the combined use of electrical, material, and thermal energy flows under real operating conditions. To this end, a large-scale photovoltaic system, an alkaline water electrolyzer, a hydrogen storage unit, a hydrogen combined heat and power plant, and an air heat pump are integrated into an existing energy network system at the EST. The test field offers a unique real-world laboratory environment with practical degrees of freedom, enabling both the investigation of system dynamics and grid stability as well as the development of digital control and

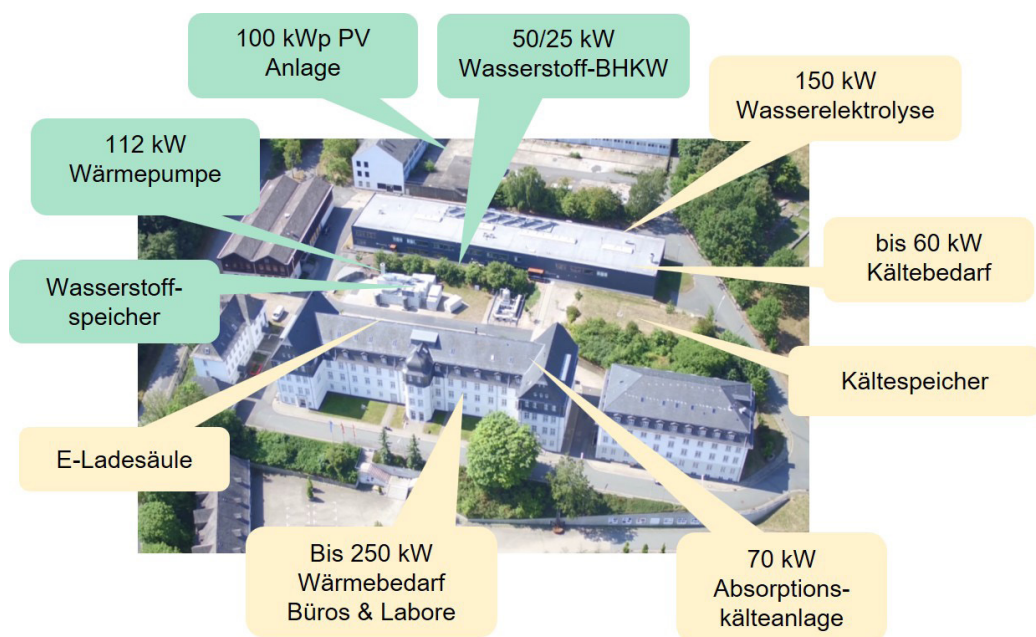


Abbildung 1: Forschungsinfrastruktur zur sektorenübergreifenden Integration von grünem Wasserstoff, in gelb der Bestand und in grün die Erweiterung durch das H2-SEKO Projekt.

optimization concepts. The project addresses interdisciplinary scientific questions from the fields of electrical engineering, process engineering, information and control engineering, and economics. The infrastructure supports student training and creates a foundation for future research collaborations.

Projektbeschreibung/Projektziele

Das Projekt H2-SEKO erweitert die Forschungsinfrastruktur des EST mit dem Ziel, die sektorengekoppelte Nutzung erneuerbarer Energiequellen, insbesondere durch Nutzung von grünem Wasserstoff, umfassend zu erforschen und zu optimieren ([1], [3]). Grundlage ist die Kopplung elektrischer, stofflicher und thermischer Energieflüsse in einem praxisrelevanten Leistungsbereich (>100 kW) unter realen Betriebsbedingungen. Nach Abschluss dieses Projekts steht der TU Clausthal und potentiellen Partnern ein hochgradig diverses und flexibles Testfeld, bestehend aus einer 100 kWp PV-Anlage, einer 150 kW alkalischen Wasserelektrolyse, einem Wasserstoff-Blockheizkraftwerk (BHKW) in einer Leistungsklasse von 50 kW thermisch und 25 kW elektrisch, einer 112 kW Luftwärmepumpe, und einem Festkörper-Wasserstoffspeicher, zur Erforschung komplexer technischer Fragestellungen zur Verfügung. Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens steht die detaillierte Analyse des dynamischen Verhaltens sowie der Betriebsstabilität dieses kopplungsintensiven Multi-Energiesystems unter variierenden Last- und Erzeugungsbedingungen ([2], [4]). Dabei soll insbesondere die wechselseitige Beeinflussung der Komponenten im Hinblick auf transient-dynamische Prozesse erforscht werden, um Regelungs- und Stabilitätsgrenzen zu identifizieren. Auf dieser Grundlage wird die quantitative Bewertung netzrückwirkender Effekte auf die Wasserstofftechnologien sowohl im Parallelbetrieb mit dem öffentlichen Netz als auch unter Inselbetriebsbedingungen ermöglicht. Das übergreifende Ziel ist es, robuste Betriebsstrategien für die Integration volatiler erneuerbarer Energien zu entwickeln, die zukünftig Netzsicherheit und Versorgungsstabilität gewährleisten können.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt auf der Charakterisierung und präzisen Modellierung der alkalischen Elektrolyse. Hierbei wird die Lastfolgegenauigkeit und dynamische Reaktionsfähigkeit der Elektrolyseanlage hinsichtlich ihres flexiblen Betriebs untersucht, um eine optimale Anpassung an volatiles Erzeu-

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

H2-SEKO: Integration von grünem Wasserstoff in sektorengekoppelte Energiesysteme

Fördermittelgeber:

Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie Land Niedersachsen

Förderkennzeichen:

ZW7-87019051

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2024 – 30.09.2027

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek

Projektbearbeiter:innen:

Dr.-Ing. Ralf Bengler

Dr.-Ing. Marina Becker

Till Kirchhoff, M.Sc.

Dr. Jens-Peter Springmann



Thomas Turek



Ralf Bengler



Marina Becker



Jens-Peter Springmann

gungsverhalten zu ermöglichen. Mittels der Integration neuartiger hochfrequenter Sensorik werden kritische Parameter wie die Wasserstoffkonzentrationen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung detektiert. Dies trägt maßgeblich zur Verbesserung der Sicherheit und der Betriebsführung auf Anlagenebene bei.

Übergeordnet bildet die Entwicklung integrierter Modellierungs- und Simulationswerkzeuge, unterstützt durch Methoden der Künstlichen Intelligenz, den Rahmen des Projekts. Diese Werkzeuge ermöglichen nicht nur die präzise Prognose des dynamischen Systemverhaltens unter Unsicherheiten, sondern bieten auch die Basis für die datengetriebene Optimierung der Steuerungsalgorithmen für die Energieflüsse im Gesamtsystem. So entsteht mit dem Projekt H2-SEKO an der TU Clausthal eine ganzheitliche Grundlage, um die komplexen Herausforderungen der sektorübergreifenden Energieintegration zukünftig souverän zu meistern.

Literatur

- [1] Maestre, V.M.; Ortiz, A.; Ortiz, I. The Role of Hydrogen-Based Power Systems in the Energy Transition of the Residential Sector. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 2022, 97, 561–574, doi:10.1002/jctb.6938.
- [2] Peng, B.; Li, Y.; Liu, H.; Kang, P.; Bai, Y.; Zhao, J.; Nian, H. Design of Energy Management Strategy for Integrated Energy System Including Multi-Component Electric–Thermal–Hydrogen Energy Storage. *Energies* 2024, 17, 6184, doi:10.3390/en17236184.
- [3] Du, X.; Yang, Y.; Guo, H. Optimizing Integrated Hydrogen Technologies and Demand Response for Sustainable Multi-Energy Microgrids. *Electr Eng* 2025, 107, 2621–2643, doi:10.1007/s00202-024-02645-9.
- [4] Fang, X.; Dong, W.; Wang, Y.; Yang, Q. Multi-Stage and Multi-Timescale Optimal Energy Management for Hydrogen-Based Integrated Energy Systems. *Energy* 2024, 286, 129576, doi:10.1016/j.energy.2023.129576.

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. MacGhyver entwickelt eine mikrofluidische, separatorlose alkalische Wasserelektrolyse mit geringem Einsatz kritischer Rohstoffe. Nach erfolgreichen Vorversuchen mit pharmazeutischen Abwässern – die jedoch Titansubstrate und edelmetallhaltige Anodenbeschichtungen erfordert hätten – wurde der Fokus auf die reine Wasserstoffherzeugung mit CRM-armen Materialien verlagert. Kern des Ansatzes sind Edelstahlelektroden mit PGM-freien Beschichtungen: Nickel-Molybdän für die Wasserstoffentwicklung (HER) und Nickel-Eisen-LDH für die Sauerstoffentwicklung (OER). Feine Gewebe und Filze werden hinsichtlich Permeabilität, Benetzung und Blasenabzug optimiert, um eine gleichmäßige Durchströmung ohne Verblockung sicherzustellen. Skalierbare galvanische Vorbehandlungen und Abscheideprozesse liefern reproduzierbare, mikrofluidik-taugliche Schichten. Bereits erreicht wurden Zellspannungen $< 1,7$ V bei ~ 1 A cm⁻²; Arbeiten zu Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität laufen. Ein Demonstrator im kW-Maßstab ist für Anfang 2026 geplant.

Summary

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 project advances a microfluidic, separator-less alkaline electrolysis with low critical raw material content. Following promising trials with pharmaceutical wastewater—which would have required titanium substrates and PGM-based anode coatings—the focus pivoted to hydrogen generation using CRM-lean materials. The core concept employs stain-

less-steel electrodes with PGM-free coatings: nickel–molybdenum for the hydrogen evolution reaction (HER) and nickel–iron layered double hydroxides for the oxygen evolution reaction (OER). Fine meshes and felts are engineered for permeability, wetting, and bubble release to ensure uniform through-flow without blockage. Scalable galvanic pretreatments and deposition routes yield reproducible, microfluidics-ready layers. Cell voltages below 1.7 V at ~ 1 A cm⁻² have been demonstrated; ongoing work targets improved reproducibility and durability. A kW-scale demonstrator is planned for early 2026.

Projektbeschreibung/Projektziele

MacGhyver verfolgt das Ziel, Wasserstoff in einem mikrofluidischen, separatorlosen Zelldesign kostengünstig und effizient zu erzeugen. Ursprünglich war vorgesehen, Abwasser – insbesondere pharmazeutische Abwässer – direkt elektrochemisch zu behandeln, Schadstoffe zu eliminieren und dabei gleichzeitig Wasserstoff bereitzustellen. Erste Versuche bestätigten das prinzipielle Potenzial: Durch den verbesserten Stofftransport in der Mikrokanalarchitektur wurde eine gegenüber der Literatur verbesserte Performance erreicht. Allerdings erfordert die

Projektpartner

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

Projektkoordinator:

- EdenTech (Frankreich)

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 des Vorhabens:

01.09.2022 – 31.08.2026

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek

Projektbearbeiter:innen:

Dr.- Ing. Maik Becker

Lydia Weseler, M. Sc.

Dr. Aleksandra Gladkova



Thomas Turek



Lydia Weseler



Maik Becker



Aleksandra Gladkova

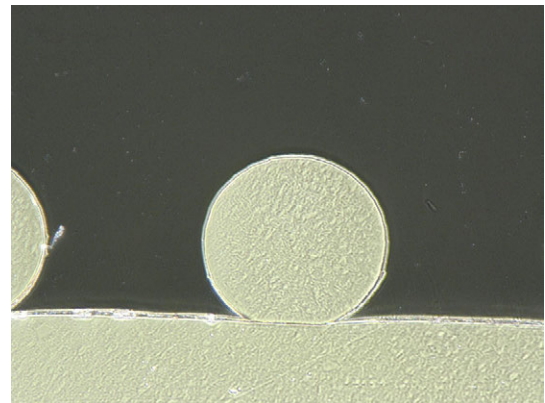
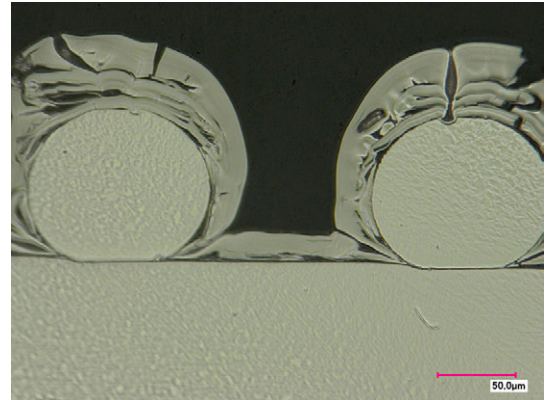


Abbildung 1: Querschnitt einer mit Nickel-Molybdän beschichteten Edelstahlelektrode für die Wasserstoffentwicklung (oben), Querschnitt einer mit Nickel-Eisen-LDH beschichteten Edelstahlelektrode für die Sauerstoffentwicklung (unten).

zuverlässige anodische Oxidation organischer Schadstoffe korrosionsbeständige Titansubstrate, die in der Regel mit edelmetallhaltigen (Platingruppenmetalle) Beschichtungen versehen werden müssen. Diese Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen und der unklare kommerzielle Mehrwert dieses Pfades haben das Konsortium veranlasst, den Schwerpunkt neu auszurichten und die Wasserstoffherstellung in den Mittelpunkt zu stellen.

Der aktuelle Fokus liegt daher auf der klassischen, jedoch mikrofluidisch ausgeführten alkalischen Elektrolyse mit materialseitig geringer Kritikalität. Im separatorlosen Ansatz entfallen Separatoren; der sehr kleine Elektrodenabstand senkt ohmsche Verluste, stellt aber erhöhte Anforderungen an Gasblasenmanagement, Benetzung und Beschichtungsstabilität [1]. Entwickelt werden hochperformante Elektroden auf unkritischen Substraten: Als Träger dienen Edelstähle, beschichtet mit Nickel-Molybdän für die HER [2] und Nickel-Eisen-Layered-Dou-

ble-Hydroxides (LDH) für die OER [3]. Dies ist die primäre Aufgabe am EST.

Für die Substrate werden Edelstahlgewebe und -filze mit unterschiedlicher Maschenstruktur und -weite untersucht [4]. Eine gleichmäßige Durchströmung der Mikrokanäle erfordert eine geeignete, d. h. hinreichend hohe, aber kontrollierte Permeabilität. Zu feine Strukturen können über die Betriebsdauer Gasblasen akkumulieren, aktive Flächen verblocken und die Leistung mindern [5]. Entscheidend ist daher ein belastbarer Kompromiss aus Elektrodenstruktur, hoher spezifischer Oberfläche, passender Permeabilität und gutem Benetzungsverhalten bei gleichzeitig möglichst wirtschaftlicher Fertigung. Der Herstellpfad kombiniert skalierbaren galvanische Vorbehandlungen und Abscheidungsverfahren, um reproduzierbare, PGM-freie und mikrofluidik-taugliche Beschichtungen zu realisieren.

Bisher wurden sehr gute Beschichtungsergebnisse erzielt: Zellspannungen unter 1,7 V bei Stromdichten um 1 A cm⁻² sind erreichbar. Die Reproduzierbarkeit und die Langzeitstabilität der Elektroden bieten noch Verbesserungspotenzial und werden derzeit systematisch adressiert. Zu Beginn des Jahres 2026 ist die Übertragung des Zellkonzepts auf einen größeren Prüfstand geplant; ein erster Demonstrator im kW-Maßstab soll anschließend in Betrieb genommen werden.

Literatur

- [1] A. Manzotti, M. Robson, und F. Ciucci, „Recent developments in membrandless electrolysis“, *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* Bd. 40, 2023, doi: 10.1016/j.cogsc.2023.100765.
- [2] H. Liu, D. Liu, X. Cheng, Z. Hua, und S. He, „One-step electrodeposition of Ni-Mo electrode with column-pyramid hierarchical structure for highly-efficient hydrogen evolution“, *Mater. Des.*, Bd. 222, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111427>.
- [3] S. Rosenberg, „Nickel and its alloys“, *National Bureau of Standards Monograph 106*, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1968, S. 56-58.
- [4] H. I. Lee, H.-S. Cho, H. Lee, J. Kim, S. Kim, u. a., „Synthesis, electrochemical properties, and application of novel materials in electrochemistry“, *Front. Chem.*, Bd. 9, 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.787787.
- [5] X. Wei, Y. Umehara, H. Nakajima, K. Ito, A. Etoh und S. Mori, „Effect of mesh size of Ni wire mesh electrodes on alkaline water electrolysis performance: A study based on the observation of bubble departure behavior“, *Int. J. Hydrogen Energy*, Bd. 120, S. 189-200, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.03.267.

StaR – Stack Revolution

Kurzfassung

StaR – Stack Revolution ist ein vom BMFTR im Rahmen von H2Giga geförderter Verbund mit dem Ziel, kosteneffiziente Stacks für die alkalische Wasserelektrolyse zu entwickeln. Die TU Clausthal übernimmt zentrale Aufgaben in der Materialcharakterisierung von Elektroden und Separatoren, im Zell- und Stackdesign, in der Modellierung und in der experimentellen Validierung im 150 kW-Shortstacktestfeld. Seit 2021 wurden am EST fünf Labor-Testfelder sowie das Shortstacktestfeld aufgebaut. Eine zusätzliche Förderung ermöglichte den Ausbau um eine großflächige Stromdichtemesskarte, eine Kompressionseinheit, hochdynamische Messketten, optimierte Demister, ein Partikelgrößen- und ein Blasengrößenmessgerät sowie ein ICP-OES-Gerät zur präzisen Elektrolytanalyse. Auf dieser Basis wurden Streuströme und die Leitfähigkeit zweiphasiger Strömungen experimentell beschrieben, der Gasphasenanteil in Zellen industrieller Höhe quantifiziert und neue funktionale Materialien mitsamt einer methodensicheren Charakterisierung bewertet. Ein bestehendes 0D-Zellmodell wurde zu einem 1D-Modell mit vertikalen Gradienten erweitert und wird mit einem offen dokumentierten Shortstack und einer schmalen, hohen Laborzelle validiert. Die gewonnenen Erkenntnisse flossen in das Design und den Betrieb mehrerer Stackgenerationen ein und unterstützen deren kontinuierliche Verbesserung.

Summary

StaR – Stack Revolution is a BMFTR funded collaboration targeting cost-effective stacks for

alkaline water electrolysis. Clausthal University of Technology leads material characterization of electrodes and separators, cell/stack design, modeling and validation in a 150 kW short-stack test field. Since 2021, five lab test fields and the short-stack facility have been commissioned at the EST. Additional funding enabled major upgrades: a large-area local current density mapping card, a compression unit, high-bandwidth voltage/current diagnostics, optimized demisters, particle- and bubble-size analyzers, and ICP-OES for sensitive electrolyte analysis. These tools allowed experimental quantification of shunt currents and two-phase conductivity, measurement of the gas phase fraction in industrial-height cells, and a method-robust assessment of new functional materials. A former 0D cell model was extended to 1D to capture vertical gradients and is being validated with an open-source short stack and a tall, slim laboratory cell. The insights directly informed design and operation of multiple stack generations and supported their continuous improvement.

Verbundprojekt StaR im Rahmen der Technologieplattform H2Giga

Im Projekt StaR wurden der Betrieb und die gezielte Weiterentwicklung alkalischer Shortstacks am Wasserelektrolysetestfeld des EST konsequent fortgeführt. Zahlreiche neue Stackgenerationen des Industriepartners WEW wurden unter realitätsnahen Bedingungen charakterisiert und die Ergebnisse wurden zur kontinuierlichen Optimierung des Stackdesigns genutzt. Eine Aufstockung der Mittel ermöglichte substanzielle Erweiterungen der Infrastruktur: Das Shortstack-Testfeld (Abbildung 1) erhielt eine große Stromdichtemesskarte zur orts aufgelösten Analyse der lokalen Stromverteilung, eine Kompressionseinheit zur Untersuchung des gekoppelten Verhaltens aus Anlage und Kompressor, hochdynamische Messaufnehmer für Spannung und Strom am Stack, optimierte Demister zur Abtrennung von Aerosolpartikeln sowie ein Partikelgrößenmessgerät zur Bewertung der Partikelkonzentration und Partikelgrößenverteilung im Wasserstoffstrom. Für die kleineren Laborzelltestfelder konnte darüber hinaus ein Blasengrößenmessgerät zur Charakterisierung der Gasphasen in Laborzellen in Betrieb genommen werden.

Projektpartner

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



Abbildung 1:
Shortstack-Testfeld
am EST mit erweiter-
ter Messtechnik und
Kompressionseinheit.

Ferner wurde ein ICP-OES-Gerät angeschafft, das über eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Anorganische und Analytische Chemie eine präzise Bestimmung von Verunreinigungen im Elektrolyten ermöglicht.

Neben der Charakterisierung im Shortstacktestfeld wurden vielfältige weitere Themen mit stärker ingenieurwissenschaftlichem Kontext bearbeitet. Dies umfasste das Thema Streuströme, neue funktionale Materialien, Designs von Laborzellen und die Modellierung von Shortstacks.

Ein Modell zur Ermittlung von Streuströmen in realen Verschaltungskonzepten einschließlich der Verschaltung mehrerer Stacks und unterschiedlichen Erdungsvarianten wurde erstellt [1]. Der Effekt von Gasblasen hat einen entscheidenden Einfluss auf die effektive Leitfähigkeit des Lauge-Gasgemisches in den Ausgangsleitungen. Dies ist relevant für die Streuströme und wurde experimentell näher untersucht. Dabei wurden Betriebsbedingungen und Designparameter der Schläuche variiert (z.B. horizontal/ vertikal). Die Resultate zeigen Abweichungen von der Literatur (Abbildung 2) und können in verbesserte Korrelationen für die Modelle fließen. Neben Effizienzverlusten kön-

nen Streuströme Korrosionseffekte verursachen. Um dies zugänglich zu machen, wurde ein großer Aufwand in die Anpassung eines Laborzellendesigns gesteckt, das eine gute Auflösung der Stromdichte an der Elektrode und eine experimentelle Bewertung von Streustromaspekten ermöglicht.

Weitere funktionale Materialien wurden charakterisiert, wobei unterschiedliche Elektrodenmaterialien und Elektrodenstrukturen bewertet wurden. Dabei zeigt sich eine signifikante Sensitivität des Charakterisierungsprozesses auf die erreichbare Performance, aber auch die Struktur und Anordnung der Elektroden hat einen entscheidenden Einfluss. Neu in den Markt eingetretene Unternehmen liefern neue Separatoren, die hinsichtlich Crossover, Widerstand und Stabilität untersucht wurden.

Der Gasphasenanteil hat neben dem Einfluss auf die Streuströme auch eine entscheidende Bedeutung für die Performance der Zellen, da die Gasblasen Elektrodenbereiche abschatten können und auch den Stofftransport innerhalb der Zelle maßgeblich beeinflussen. Der Einfluss unterschiedlicher Gasvolumenströme auf verschiedene Elektrodenmaterialien und ver-

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:
StaR-Stack Revolution

Fördermittelgeber:
Bundesministerium für Forschung,
Technologie und Raumfahrt

Förderkennzeichen:
03HY102B

Laufzeit des Vorhabens:
01.04.2021–31.12.2025

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

Projektbearbeiter:innen:
Simon Appelhaus, M.Sc.
Dr. rer. nat. Stina Bauer
Felix Gäde, M.Sc.
Aaron Rehmer
Lavrans Söffker, M.Sc.
Oliver Zielinski, M.Sc.



Thomas Turek



Maik Becker

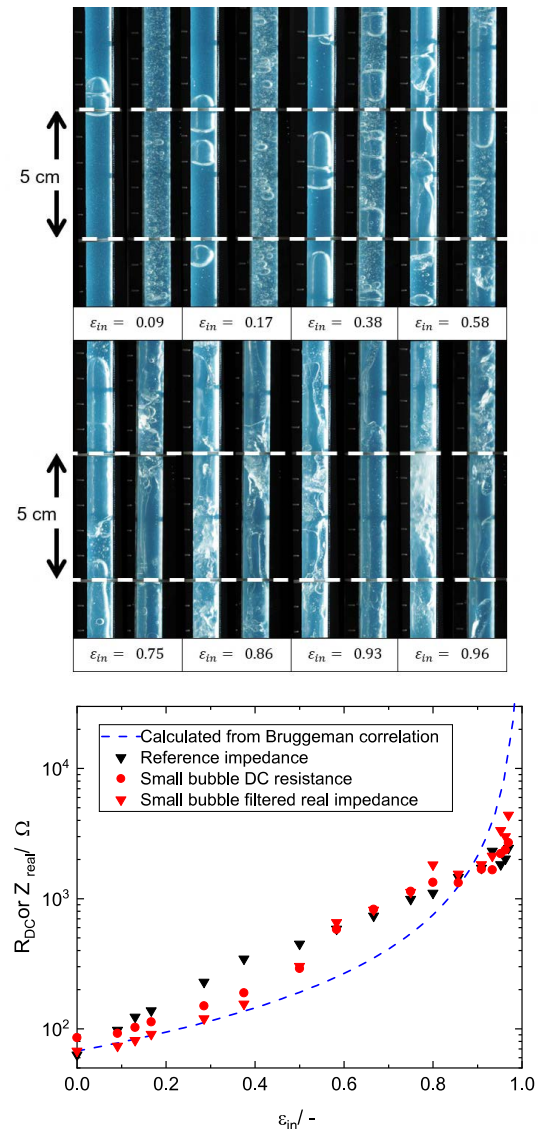


Abbildung 2: Aufnahmen der Gas-Lauge Strömung durch vertikale Schlauchleitungen (oben), Verlauf der Widerstandsänderung der Mehrphasenströmung bei unterschiedlichen Eingangsgasphasenanteilen (unten).

schiedenen Zellinternals (Gitter, Vlies, Schaum, Elastikelemente) wurde untersucht und eine angepasste Korrelation zur Bestimmung des Gasphasenanteils ermittelt. Diese wird implementiert in das weiterentwickelte 1D-Modell, das auf früheren Arbeiten zu einem 0D-Modell beruht [2], [3]. Das neue Modell erlaubt die Abbildung unterschiedlicher Gasphasenanteile über der Zellhöhe. Dadurch ergeben sich neue vertikale Gradienten der Leitfähigkeit, der Konzentrationen und der Stromdichte, die das Verhalten der Shortstacks besser beschreiben können. Das Modell zeigt aber auch eine hohe Sensitivität hinsichtlich der Gasblasengröße, die insbesondere als Funktion der Höhe nicht ausreichend bekannt ist. Um diese Fragestellung

weiter zu erfassen, wurden ein Open Source Shortstack und eine schmale, hohe 1000 cm² Laborzelle entwickelt und aufgebaut, die in Kombination mit der vorhandenen Mestech-nik (Blasengröße, Stromdichtemesskarte) in den vorhandenen Testfeldern auch zukünftig weitere relevante Einblicke in das tatsächliche Betriebsverhalten realitätsnaher, hoher Wasse-relektrolysezellen und Stacks ermöglichen.

Literatur

- [1] S. Appelhaus, M. Becker, H. Becker, T. Turek, Modelling and Optimization of Shunt Current Management in Industrial Alkaline Water Electrolysis: Grounding, Forced Potentials and Combination of Multiple Stacks ECS Meeting Abstracts, Volume MA2024-02, F01: Advances in Industrial Electrochemistry and Electrochemical Engineering DOI 10.1149/MA2024-02252003mtgabs.
- [2] Haug, P.; Kreitz, B.; Koj, M.; Turek, T. Process modelling of an alkaline water electrolyzer Int. J. Hydrogen Energy. 42 (2017) 15689-15707 dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.031.
- [3] Brauns, J.; Turek, T. Model-Based Analysis and Optimization of Pressurized Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy J. Electrochem. Soc. 170 (2023) 064510 doi.org/10.1149/1945-7111/acd9f1.

Niedersächsisches Kompetenznetzwerk NextGenPV: Photovoltaik der nächsten Generation

Kurzfassung

Im Rahmen der Ausbauoffensive Solarenergieforschung investiert Niedersachsen 10 Millionen Euro in das Niedersächsische Kompetenznetzwerk NextGenPV. Die Förderung schafft geeignete Rahmenbedingungen für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen heimischen Photovoltaik (PV)-Industrie und stärkt den zukünftig klimaneutralen Wirtschaftsstandort Niedersachsen. Ziel von NextGenPV ist es, PV-Module der nächsten Generation entwickelt. Dazu werden stabile Perowskit-Absorber für hocheffiziente Tandem-Photovoltaik entwickelt. Die Absorber werden in Solarzellen und Module mit höchsten Wirkungsgraden überführt, deren Leistungsfähigkeit und Langzeitstabilität demonstriert werden. Parallel werden die Herstellungsprozesse mit Blick auf Prozessrobustheit, Skalierbarkeit, Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit qualifiziert. An der TU Clausthal werden unter der Leitung von Frau Prof. Christine Minke die ökologische Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit der innovativen Materialien und Module erforscht. Die Erkenntnisse fließen iterativ in die nachhaltige Technologieentwicklung von Tandem-Photovoltaik der nächsten Generation ein.

Summary

As part of the state's Solar Energy Research Offensive, Lower Saxony is investing 10 million Euros in the NextGenPV competence network. This funding creates the conditions for building a competitive domestic PV industry and supports Lower Saxony's transition to a climate-neutral economy. NextGenPV aims to develop next-generation PV modules by advancing stable perovskite absorbers for high-efficiency tandem PV. These absorbers will be integrated into solar cells and modules targeting state-of-the-art efficiencies, with performance and long-term stability demonstrated under relevant operating conditions. In parallel, manufacturing routes will be qualified for process robustness, scalability, sustainability and circularity. At Clausthal University of Technology Prof. Christine Minke and her team investi-

gate the environmental sustainability and circularity of the novel materials and modules. The resulting insights feed iteratively into the sustainable technology development of next-generation tandem photovoltaics.

NextGenPV als Teil der Ausbau-offensive Solarenergieforschung Niedersachsen

Mit dem Ziel, Niedersachsen bis 2040 treibhausgasneutral zu machen, stellt das Land im Rahmen seiner Ausbauagenda für Wind- und Solarenergie 22 Millionen Euro für die Solarenergieforschung bereit. Als Flächen- und Küstenland verfügt Niedersachsen über besonders vorteilhafte Voraussetzungen für die Nutzung erneuerbarer Energien aus Wind und Sonne. Die Finanzierung erfolgt über die Förderlinie zukunfft.niedersachsen des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur in Kooperation mit der VolkswagenStiftung.

Projektpartner

- Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal GmbH
- Leibniz Universität Hannover, Leibniz Forschungszentrum Energie 2050
- Leibniz Universität Hannover, Institut für anorganische Chemie
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Festkörperphysik
- Leibniz Universität Hannover, Institut für Mineralogie
- Carl von Ossietzky-Universität Oldenburg, Institut für Chemie
- Karlsruhe Institute of Technology, Light Technology Institute
- Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
- TU Braunschweig, Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
- TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik

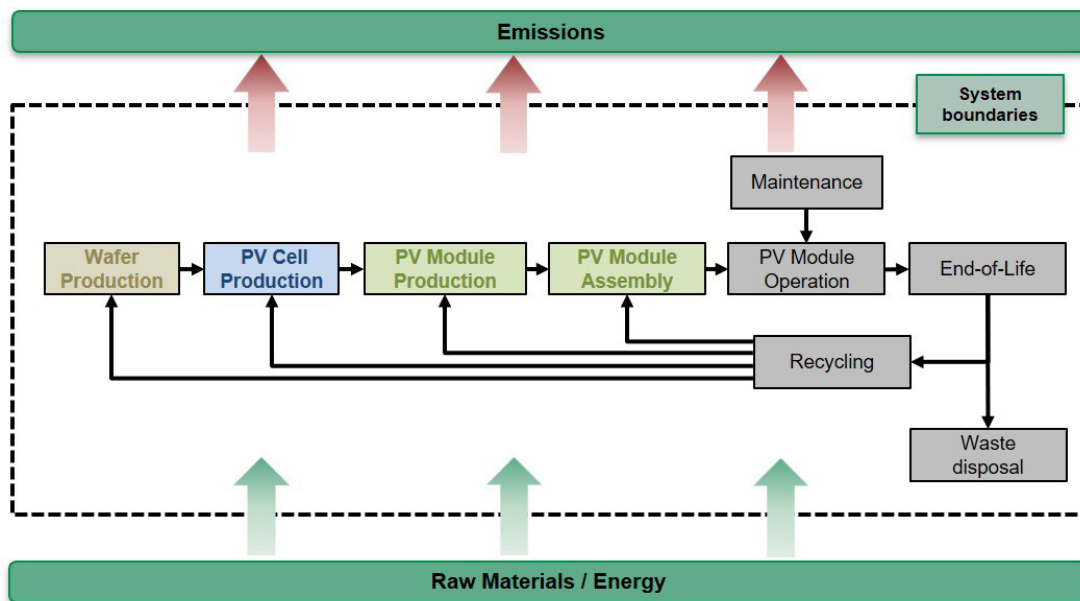


Abbildung 1: Systemdefinition für die Nachhaltigkeitsbewertung von Produktion und Recycling neuartiger Perowskit-Tandem-PV-Module.

Aus diesen Mitteln werden zwei wegweisende Forschungsprojekte gefördert: 10 Millionen Euro fließen in das Niedersächsische Kompetenznetzwerk „Photovoltaik der nächsten Generation (NextGenPV)“, bestehend aus dem Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), den Mitgliedsuniversitäten des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (efzn), sowie dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

und dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB). Mit weitere 12 Millionen Euro wird das Graduiertenkolleg „Grundlagen für Photovoltaik-Technologien der Zukunft (FuturePV)“ gefördert, um Produktionsprozesse für Siliziumsolarzellen zu entwickeln und zu erproben. Für die administrative Koordination des Netzwerks zeichnet das Leibniz-Forschungszentrum Energie (LiFE 2050) verantwortlich, während die inhaltliche

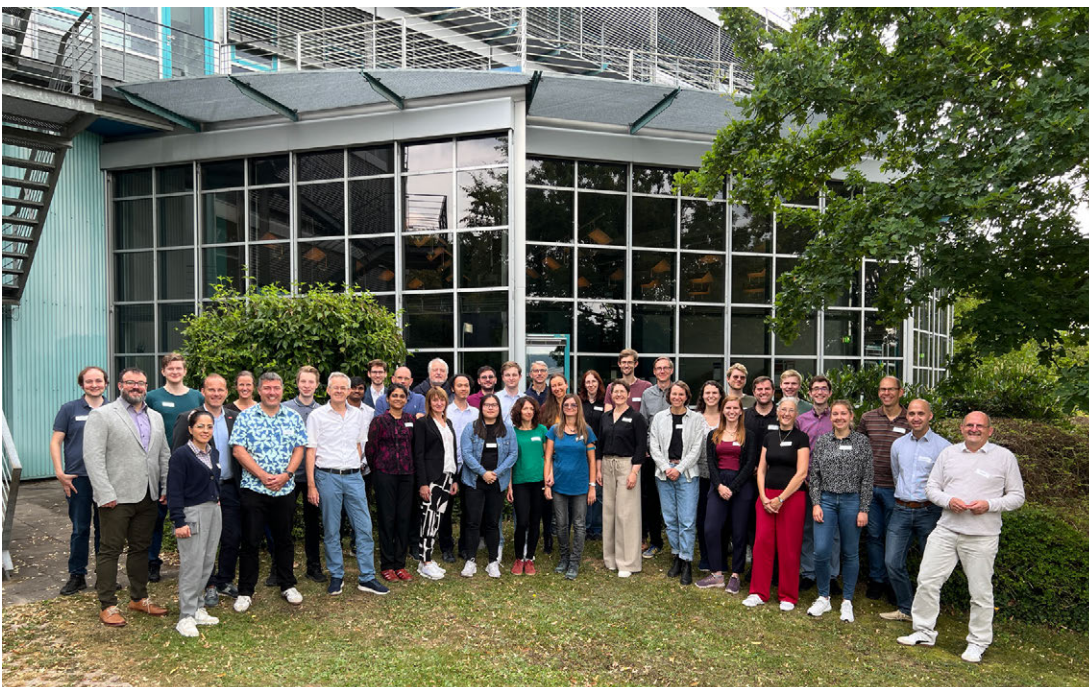


Abbildung 2: Mitwirkende der Forschungsprojekte FuturePV und NextGenPV bei der PV Summer School am 09.09.2025 am ISFH in Emmerthal.

Koordination beim ISFH liegt. Die Förderung schafft einzigartige Rahmenbedingungen, die den Aufbau einer wettbewerbsfähigen heimischen Photovoltaik-Industrie ermöglichen und den Wirtschaftsstandort Niedersachsen langfristig stärken sollen.

Projektziele

NextGenPV zielt darauf, stabile Perowskit-Absorber für hocheffiziente Tandem-Photovoltaik zu entwickeln und für die spätere industrielle Umsetzung vorzubereiten. Hierzu werden zunächst die theoretischen Grundlagen für Stabilitätsmechanismen erarbeitet, geeignete Additive synthetisiert und in einen skalierbaren Perowskit-Abscheideprozess integriert. Auf dieser Basis werden die Absorber in Solarzellen und Module mit höchsten Wirkungsgraden überführt. Ihre Leistungsfähigkeit und Langzeitstabilität werden experimentell demonstriert. Parallel wird der Herstellungsprozess in Richtung Industrialisierung qualifiziert, einschließlich Prozessrobustheit und Übertragbarkeit.

An der Technischen Universität Clausthal wird unter der Leitung von Frau Prof. Christine Minke die ökologische Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit der neuen Materialien, Prozesse und Module erforscht. Dazu werden mit der Methode des Life Cycle Assessment (LCA) nach DIN ISO 14040/14044 Prozessmodelle über den gesamten Lebenszyklus der PV-Module entwickelt (Abbildung 1). Neben potenziellen CO₂-Emissionen werden Kennzahlen zu Toxizität und Ressourcenverbrauch berechnet und im Kontext der Energy-Payback-Time zur Bewertung der neuen PV-Module herangezogen. Diese Erkenntnisse zu ökologischer Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz fließen iterativ in die nachhaltige Technologieentwicklung ein.

Das Projekt ordnet damit die technologischen Fortschritte in den gesellschaftlichen Rahmen der nachhaltigen Entwicklung ein und bewertet die daraus resultierenden Chancen und Herausforderungen insbesondere für Niedersachsen. Zudem stärkt NextGenPV die Vernetzung der niedersächsischen PV-Forschung im Bereich Tandemsolarzellen, fördert den Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft (u. a. über Workshops zum Technologietransfer) und etabliert eine Entwicklungsplattform für Start-ups und etablierte Unternehmen, die Tandem-Photovoltaik zur Anwendung bringen möchten.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

NextGenPV: Photovoltaik der nächsten Generation – Niedersächsisches Kompetenznetzwerk

Fördermittelgeber:

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur mit Mitteln aus dem Programm zukunft.niedersachsen der VolkswagenStiftung

Förderkennzeichen:

ZN4271

Laufzeit des Vorhabens:

01.12.2023–30.11.2027

Projektleiterin:

Prof. Dr.-Ing. Christine Minke MBA

Projektbearbeiter:

Dipl.-Umweltwiss. Jan Schlecht



Christine Minke



Jan Schlecht

Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden

Kurzfassung

Im Rahmen der DFG-Forschungsgruppe „Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden“ (FOR 5044) werden die grundlegenden Prozesse der Defektbildung und der Einfluss periodischer, niedrigdimensionaler Defektstrukturen in polaren Oxiden systematisch untersucht. Das Ziel besteht darin, die zugrunde liegenden Mechanismen zu verstehen und aktiv zu kontrollieren, um die resultierenden funktionalen Eigenschaften wie etwa die elektrische Leitfähigkeit, die piezoelektrische Antwort oder die optischen Charakteristika, gezielt zu beeinflussen.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen Lithiumniobat-Tantalat-Mischkristalle $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ (LNT). Diese Mischkristalle kombinieren die hohe Curie-Temperatur und die verhältnismäßig hohen piezoelektrischen Koeffizienten von LiNbO_3 mit der guten thermischen Stabilität und den geringen akustischen Verlusten von LiTaO_3 . Daher bieten sie ein vielseitig einsetzbares Modellsystem, um den Zusammenhang zwischen Zusammensetzung, Defektchemie und funktionalen Materialeigenschaften gezielt zu untersuchen und zu steuern.

Durch die enge Verknüpfung von Kristallzüchtung, elektrischer und akustischer Charakterisierung, theoretischer Modellierung sowie spektroskopischen Analyseverfahren wurden

Korrelationen zwischen atomaren Strukturmerkmalen und makroskopischen Eigenschaften herausgearbeitet. Die gewonnenen Erkenntnisse sind eine wesentliche Grundlage für zukünftige technologische Anwendungen in den Bereichen Sensorik, Optoelektronik und Hochtemperatur-Piezoelektrik.

Summary

The research unit of the German Research Foundation *Periodic Low-Dimensional Defect Structures in Polar Oxides (FOR5044)* focusses on the fundamental mechanisms that govern the formation of defects and effects of periodic, low-dimensional defect structures in polar oxides. The overall objective is to elucidate these defect architectures and actively control them in order to tailor functional properties, including electrical conductivity, piezoelectric response and optical behavior.

The primary focus is on lithium niobate-tantalate solid solutions LNT. These materials combine the high Curie temperature and relatively high piezoelectric coefficients of LiNbO_3 with the good thermal stability and low acoustic losses of LiTaO_3 . Due to this unique combination of characteristics, they constitute a robust and versatile model system for the systematic tuning of functional material properties through controlled compositional variation and defect engineering.

Integrating crystal growth, electrical and acoustic characterization, theoretical modelling and advanced spectroscopic techniques establishes direct correlations between atomic-scale structural features and macroscopic physical properties. These insights provide a fundamental basis for developing next-generation technologies for sensing, optoelectronics, and high-temperature piezoelectric applications.

Projektansatz

Das Projekt führt Aspekte der Physik und der Materialwissenschaften zusammen. Die Themen umfassen Kristallzüchtung (S. Ganschow, Berlin), Ionentransport (H. Schmidt, Clausthal-Zellerfeld), thermische Stabilität (Y. Suhak, Goslar), Polaronendynamik (M. Imlau, Osn-

Projektpartner

- IKZ Berlin – Sektion Oxide & Fluoride
- IEPT und IMET (TUC)
- Universität Osnabrück – Experimentalphysik
- Uni Paderborn – Experimentalphysik/Photophysik
- TU Dresden – Experimentalphysik/Photophysik
- JLU Gießen – Institut für Theoretische Physik
- IKZ Berlin – Abteilung Nanostrukturen & Schichten

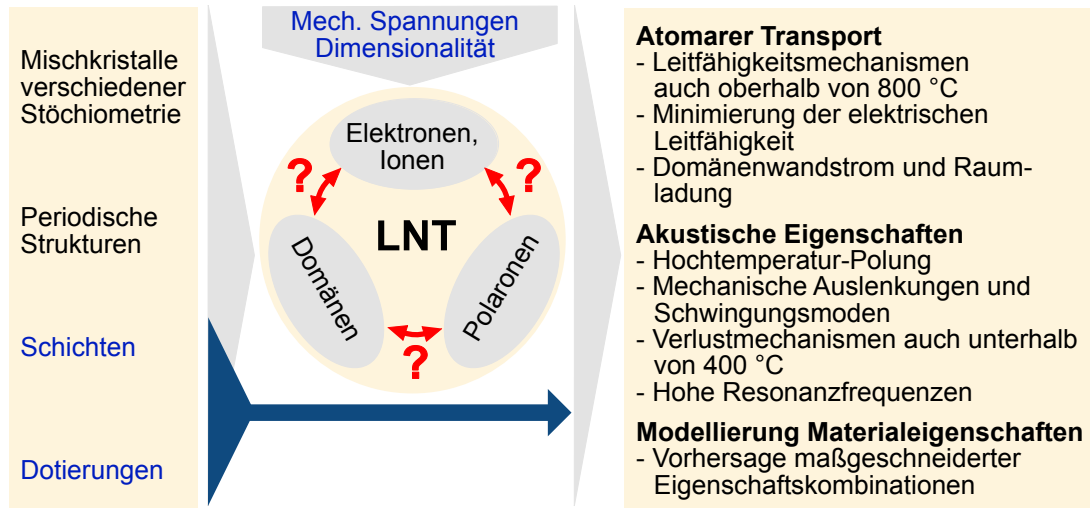


Abbildung 1: Forschungsansätze zu atomarem Transport, akustischen Eigenschaften und zur Modellierung von LNT-Kristallen.

brück), Domänenstrukturen und -wände (C. Silberhorn, Paderborn; L. Eng, Dresden), akustische Verluste (H. Fritze, Goslar), physikalische Modellierung (S. Sanna, Gießen) und dünne Schichten (J. Schwarzkopf, Berlin). Ergänzend trägt K. D. Becker (Braunschweig) mit seiner Expertise der optischen Eigenschaften von LNT bei.

Wesentliche Forschungsergebnisse

Den Ausgangspunkt bildet die Synthese und Charakterisierung von LNT-Mischkristallen unterschiedlicher Zusammensetzungen als Modellsystem für Defektstrukturen und deren Einfluss auf die funktionalen Eigenschaften. Ergänzend dazu wurden theoretische Modelle zur Beschreibung von Ladungs-, Ionen- und Defektverteilungen entwickelt und mit elektrischen, akustischen und strukturellen Messdaten verknüpft. Punktdefekte, insbesondere Lithium- und Sauerstoffleerstellen, lassen sich durch die Variation der Stöchiometrie gezielt beeinflussen. Die enge Verzahnung von Experiment und Theorie ermöglicht die Entwicklung eines konsistenten Defektmodells, das die Grundlage für zukünftige Materialoptimierungen bildet.

Grundcharakterisierung

Im Rahmen dieses Projekts werden LNT-Volumenkristalle unterschiedlicher Zusammensetzung charakterisiert. Die Untersuchungen umfassen die elektrische Leitfähigkeit, die Curie-Temperatur, die akustischen Verluste sowie die Domänenstruktur und werden durch theore-

tische Modellierungen ergänzt. Der Ta-Gehalt wird während der Kristallzüchtung und die Li-Stöchiometrie durch *vapor transport equilibration* (VTE) variiert. Letztere rufen charakteristische Verschiebungen der Absorptionskante hervor [1] (siehe Abbildung 2). Die thermische Stabilität der Kristalle wird mittels Langzeitmessungen von Leitfähigkeit und Resonanzfrequenz evaluiert. Selbst nach über 350 h bei 700 °C zeigen kongruente und nahezu stöchiometrische LN-Proben keine signifikanten Veränderungen. Kurzzeitexperimente über wenige Tage ermöglichen zudem Untersuchungen bei höheren Temperaturen, wobei auch Li-defizitäre Mischkristalle eine vergleichbare Stabilität aufweisen. Ergänzend wird die Abhängigkeit der elektrischen und akustischen Eigenschaf-

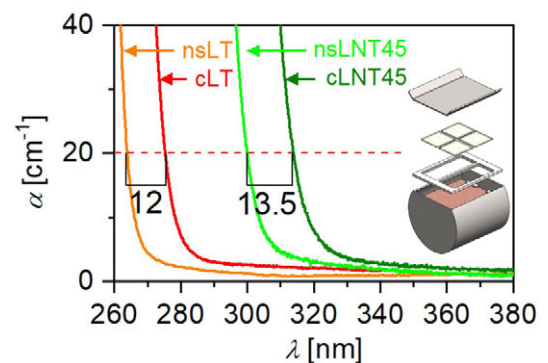


Abbildung 2: Änderungen der Li-Stöchiometrie durch VTE. Verschiebung der optischen Absorptionskante sowie Pt Kammer mit Li-haltigem Pulver und Proben (Skizze) für den VTE-Prozess. Die Zahl hinter LNT gibt den jeweiligen Tantal-Gehalt der Proben in Prozent an.

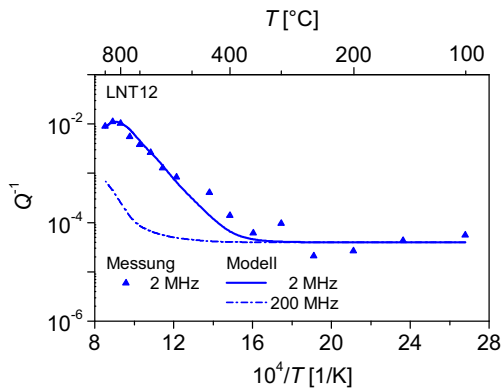


Abbildung 3: Daten und Modellierung der Gesamtverluste Q^{-1} als Funktion der Temperatur inklusive Variation der Frequenz der LNT12-Resonatoren.

ten von Temperatur, Sauerstoffpartialdruck und Nb/Ta-Verhältnis systematisch untersucht, um ein umfassendes Verständnis der Struktureigenschafts-Beziehungen in LNT zu erlangen.

Zur Analyse des Einflusses von Defekten werden die akustischen Verluste in einem weiten Temperaturbereich gemessen [3]. Resonante Messungen zeigen, dass die Dämpfung bei hohen Temperaturen verstärkt durch Relaxationsprozesse verursacht wird, die eng mit der elektrischen Leitfähigkeit und der Kristallzusammensetzung verknüpft sind. Variationen des Sauerstoffpartialdrucks oder des Nb/Ta-Verhältnisses verdeutlichen den direkten Einfluss der Defektchemie auf die Verluste. Diese Ergebnisse korrelieren mit atomaren Transportprozessen und dem Verhalten in der Nähe der Curie-Temperatur. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, zeigen Modellierungen und experimentelle Daten, dass sich sowohl die piezoelektrischen Koeffi-

zienten als auch die akustischen Eigenschaften beim Annähern an den Phasenübergang deutlich verändern. Die Kombination aus akustischer Spektroskopie, elektrischer Charakterisierung und Modellierung erweist sich somit als hochempfindliches Werkzeug zur detaillierten Beschreibung von Defekt- und Relaxationsmechanismen in polaren Oxiden.

Der identische Anstieg der Leitfähigkeit verdeutlicht, dass die elektrische Leitfähigkeit von LNT bis etwa 600 °C unabhängig vom Nb/Ta-Verhältnis ist (siehe Abbildung 4, links). In diesem Bereich zeigt das Material zudem eine nahezu vollständig ausgeprägte Isotropie des Ladungstransports, die auf die dominierende, isotrope Lithium-Migration zurückzuführen ist. Der konstante Verlauf im Bereich (I) entspricht der Aktivierungsenergie des Li-Transports. Die Modellierung des relevanten Transportschritts (siehe Abbildung 4, rechts) weist zwei nahezu äquivalente Migrationspfade aus, die parallel und senkrecht zur ferroelektrischen Achse verlaufen.

Oberhalb von 600 °C treten die charakteristischen Effekte der Mischkristalle auf. Die Leitfähigkeit nimmt zunächst stärker zu (Bereich II), während sie an der jeweiligen Curie-Temperatur einen abrupten Abfall zeigt. Dieser Bereich ist durch eine Aktivierungsenergie von etwa 2,1 eV gekennzeichnet und wird durch thermisch angeregte Elektronen erklärt, die in Polaronenzustände übergehen und zum Hopping-Transport beitragen. Mit steigendem Nb-Gehalt verstärkt sich dieser Effekt, was zu einer höheren Leitfähigkeit führt.

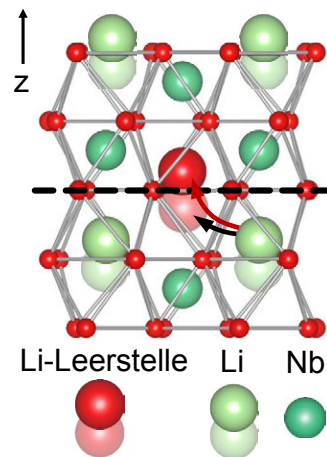
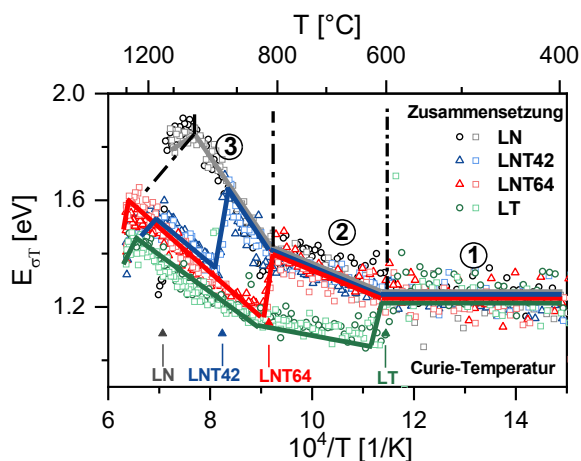


Abbildung 4: Anstieg der Leitfähigkeit (E_{at}) sowie Curie-Temperaturen (Pfeile) von LNT verschiedener Zusammensetzungen (links). Zentraler Transportschritt bei der Lithium-Migration in der ferroelektrischen (rot) und der paraelektrischen (schwarz) Phase am Beispiel von LN (rechts).

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Periodische niedrigdimensionale Defektstrukturen in polaren Oxiden

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft

Förderkennzeichen:

FOR5044 ID: 426703838;
www.for5044.de

Laufzeit des Vorhabens:

1/2020–12/2029

Projektleiter:

Prof. Holger Fritze

Teilprojektleiter:innen:

Dr. Steffen Ganschow (IKZ)
Prof. Harald Schmidt (TUC)
Dr. Yuri Suhak (TUC)
Prof. Mirco Imlau (Uni Osnabrück)
Prof. Christine Silberhorn (Uni Paderborn)
Prof. Lukas Eng (TU DD)
Prof. Holger Fritze (TUC)
Prof. Simone Sanna (JLU Gießen)
Dr. Jutta Schwarzkopf (IKZ)

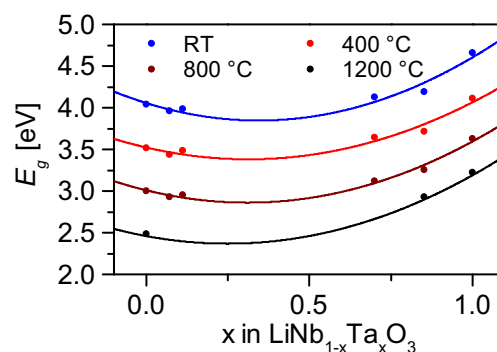


Abbildung 5: Optische Bandlücke als Funktion des Ta-Gehaltes für verschiedene Temperaturen.

Der deutliche Sprung der Aktivierungsenergie an der Curie-Temperatur wird erstmals klar herausgearbeitet. Er resultiert aus veränderten Lithium-Transportwegen in der paraelektrischen Phase (siehe Abb. 4, rechts), die eine geringere Potenzialbarriere aufweisen. Zusätzlich führt die gleichmäßige Verteilung der Lithium-Ionen auf die Sauerstoffoktaeder zu Konfigurationen mit ähnlichen Elektronenenergien an Anfangs- und Endpunkten der Transportschritte. Dies erhöht die Beweglichkeit freier Polaronen. Auch die mit der Temperatur abnehmende Bandlücke kann zur Verringerung der Aktivierungsenergie beitragen.

Die Hochtemperaturuntersuchungen werden durch optische Spektroskopie ergänzt. Von wesentlicher Bedeutung ist die lineare Temperaturabhängigkeit der Bandlückenenergie E_g in einer Phase bis 1200 °C für direkte Übergänge. Der Phasenübergang bei der Curie-Temperatur T_c zeigt sich insbesondere in LT-reichen Kristallen als leichte Änderung der Bandlückenenergie (siehe Abbildung 5) [4]. Auch die Aktivierungsenergie der elektrischen Leitfähigkeit von Li-defizitären LNT-Kristallen ändert sich beim Übergang. Dies wird auf modifizierte Transportwege der Li-Ionen in der paraelektrischen Phase zurückgeführt. Hier müssen Li-Leerstellen keine abstoßenden Sauerstoffebenen mehr überwinden, wodurch sich die Potentialbarriere reduziert.

Unter isothermen Bedingungen zeigt E_g ein leichtes Minimum bei mittlerem Ta-Gehalt (Abbildung 5), was mit der Modellierung der elektronischen Bandlücke und der Analyse des Ladungsträgertransports konsistent ist.

Die Stärkung des wissenschaftlichen Austauschs zwischen Promovierenden, Postdocs und Pro-



Abbildung 6: Sommerschule: Polar Piezoelectric Oxides.

jektleitenden bildet die Grundlage für ein inspirierendes Forschungsumfeld. Einen wichtigen Beitrag dazu leisten Formate wie die Sommerschule, an der neben Mitgliedern der FOR5044 auch Studierende weiterer Arbeitsgruppen teilnehmen (vgl. Abbildung 6: Sommerschule 2023 am IKZ Berlin). Der interdisziplinäre Dialog fördert die fachliche Vertiefung sowie die Teamfähigkeit und den informellen Wissensaustausch. Ergänzend unterstützen Veranstaltungen wie das DGM-Nachwuchsforum die wissenschaftliche Weiterentwicklung der Teilnehmenden. Um die Kohärenz der Forschungsarbeiten zu gewährleisten, bleibt der Lenkungsausschuss in engem Austausch mit den Projektleitenden und erarbeitet bei Bedarf gemeinsam Lösungen für auftretende Herausforderungen.

Literatur

- [1] E. Tichy-Racs, S. Hursky, U. Yakhnevych, S. Ganschow, P. Gaczyński, K.-D. Becker, H. Fritze, Y. Suhak; *Influence of Li-Stoichiometry on Electrical and Acoustic Properties and Temperature Stability of $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ Solid Solutions up to 900 °C*; Phys. Status Solidi A 2024, 2300962; DOI: 10.1002/pssa.202300962.
- [2] F. El Azzouzi, D. Klimm, A. Kapp, L. M. Verhoff, N. A. Schäfer, S. Ganschow, K.-D. Becker, S. Sanna, H. Fritze, *Evolution of the Electrical Conductivity of $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ Solid Solutions across the Ferroelectric Phase Transformation*; Phys. Status Solidi A 2025, 222, 2300966; DOI: 10.1002/pssa.202300966.
- [3] U. Yakhnevych, V. Sargsyan, F. El Azzouzi, A. Kapp, F. Bernhardt, Y. Suhak, S. Ganschow, H. Schmidt, S. Sanna, H. Fritze, *Acoustic Loss in $\text{LiNb}_{1-x}\text{Ta}_x\text{O}_3$ at Temperatures up to 900 °C*; Phys. Status Solidi A 2025, 222, 2400106; DOI: 10.1002/pssa.202400106
- [4] P. Gaczyński, Y. Suhak, S. Ganschow, S. Sanna, H. Fritze, K.-D. Becker; *High-Temperature Optical Spectroscopy Study of the Fundamental Absorption Edge in LiNbO_3 - LiTaO_3 Solid Solutions*, Physica Status Solidi A, 2024, 2300972; DOI: 10.1002/pssa.202300972.

TEN.efzn – Forschungsplattform „Landesgraduiertenkolleg Wasserstoff und Wasserstoffderivat Ammoniak“

Kurzfassung

Im Landesgraduiertenkolleg „Wasserstoff und Wasserstoffderivat Ammoniak“ erforschen 16 Wissenschaftler:innen zusammen mit ihren Promovierenden die Potentiale von Ammoniak aus regenerativen Quellen. Ammoniak wird zukünftig als weiterer Energieträger eine wichtige Rolle im Energiesystem spielen, da er aus Wasserstoff herstellbar ist und sehr einfach per Schiff transportiert werden kann [1]. Das Landesgraduiertenkolleg ist eine von sechs Forschungsplattformen im Forschungsprogramm TEN.efzn, das die Transformation des Energiesystems in Niedersachsen unterstützt. Im Landesgraduiertenkolleg wird in vier Innovationsbereichen der komplette Lebenszyklus des Wasserstoffderivats Ammoniak von der Synthese über die Nutzung bis hin zur Wasserstoffrückgewinnung betrachtet. Auch ökonomische, ökologische, systemische und sicherheitsrelevante Querschnittsfragen beim Einsatz von Ammoniak spielen eine wichtige Rolle. Übergeordnetes Ziel ist es, die Vor- und Nachteile gegenüber anderen Wasserstoffderivaten zu betrachten und herauszuar-

beiten, bei welchen Anwendungen Ammoniak bevorzugt zum Einsatz kommen sollte.

Summary

In the research training group “Hydrogen and Hydrogen Derivative Ammonia,” 16 scientists and their doctoral students are investigating the potential of ammonia produced from renewable sources. Ammonia will play an important role in the energy system of the future as an additional energy carrier, since it can be produced from hydrogen and is very easy to transport by ship. The research training group is one of six research platforms in the TEN.efzn research program, which supports the transformation of the energy system in Lower Saxony. The research training group examines the entire life cycle of the hydrogen derivative ammonia in four areas of innovation, from synthesis and use to hydrogen recovery. Economic, ecological, systemic, and safety-related cross-cutting issues of ammonia are also being considered. The overarching goal is to examine the advantages and

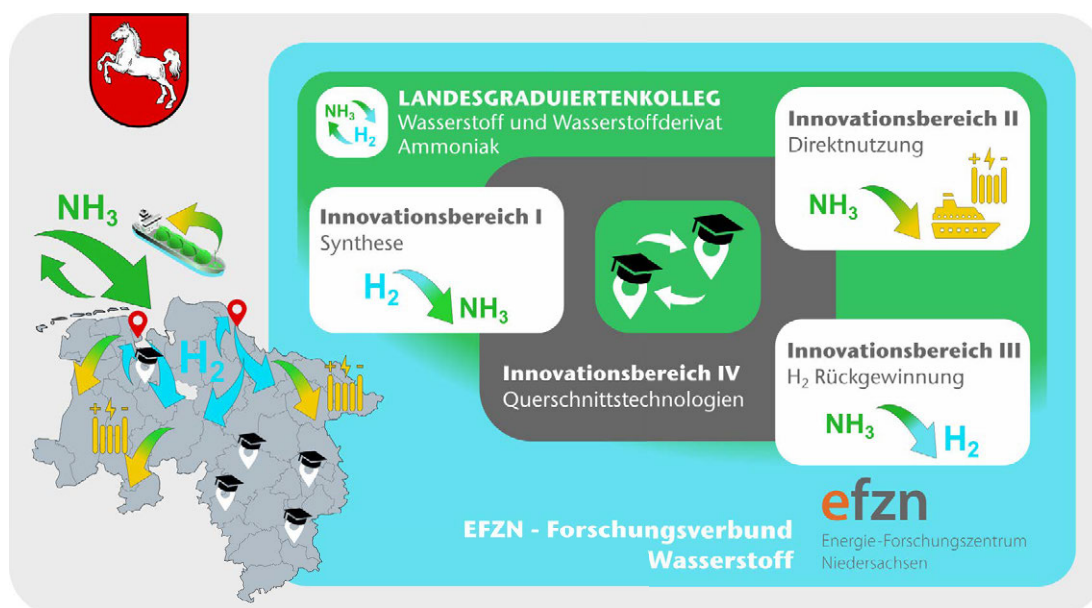


Abbildung 1: Struktur des Landesgraduiertenkollegs Wasserstoff und Wasserstoffderivat Ammoniak.

disadvantages compared to other hydrogen derivatives and to identify the applications in which ammonia should be the preferred choice.

Projekthintergrund

Wasserstoff wird im Energiesystem der Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Große Mengen an Wasserstoff werden in der chemischen Industrie, aber auch in der Stahlindustrie benötigt, wo das klassische Reduktionsmittel Kohlenstoff ersetzt werden soll, um CO₂-Emissionen zu vermeiden. Eine weitere wichtige Rolle von Wasserstoff ist die saisonale Energiespeicherung durch untertägige Speicherung und Rückverstromung während sogenannter „Dunkelflauten“. Darüber hinaus wird Wasserstoff für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe bei nicht elektrifizierbaren Mobilitätsanwendungen benötigt, beispielsweise bei Schiffen und Flugzeugen für lange Reichweiten. Der bevorzugte und nachhaltigste Weg zur Herstellung von Wasserstoff ist die Wasserelektrolyse auf Basis erneuerbarer elektrischer Energien. Angesichts der hohen Energiepreise in Deutschland ist die Herstellung der gesamten benötigten Wasserstoffmenge im Inland allein vermutlich nicht möglich, weshalb der Import von Wasserstoff vorbereitet werden muss. Bis zu Entfernungen von 3.000 – 5.000 km ist der Transport von Wasserstoff durch Pipelines die wirtschaftlichste und effizienteste Möglichkeit. Für den Transport aus weiter entfernten Regionen mit sehr gutem Angebot an erneuerbaren Energien wie Australien, Südafrika oder Südamerika kommt hingegen nur der Transport per Schiff in Frage. Hierfür wiederum ist die Verwendung von verflüssigtem, tiefkalten Wasserstoff selbst oder die Umwandlung in „Derivate“, d.h. Stoffe mit hohem Wasserstoffgehalt wie Ammoniak, Methan, Methanol oder sogenannten „Liquid Organic Hydrogen Carriers“ (LOHC) möglich. Unter den verschiedenen Derivaten zeichnet sich Ammoniak durch hohen Wasserstoffgehalt, einfache Verflüssigung sowie insbesondere durch einfache Synthese aus den Umgebungskomponenten Luft und Wasser ohne kohlenstoffhaltige Komponenten aus. Der Transport von Ammoniak ist zudem in der chemischen Industrie bereits technisch etabliert. Ammoniak kann durch katalytische Zersetzung wieder in Wasserstoff umgewandelt werden, lässt sich aber auch für viele Anwendungen direkt nutzen. Andererseits ergeben sich mit der zunehmenden Verwendung von Ammoniak angesichts seiner Brennbarkeit und Toxizität nicht zu unterschätzende Herausforderungen.

Teilprojektleitungen

TU Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Federica Ferraro, IFAS
Prof. Dr.-Ing. Sabrina Zellmer, IPAT

TU Clausthal
Prof. Dr.-Ing. Jens Bremer, ICVT
Prof. Dr.-Ing. Philip Jaeger, ITE
Prof. Dr.-Ing. Christine Minke, IEVB
Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek, ICVT

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik, Oldenburg
Dr. Corinna Harms
Dr. Dana Schonvogel

Institut für Solarenergieforschung
Hameln/Emmerthal (ISFH)
Dr. Dominic Walter

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig (PTB)
Prof. Dr. Ravi Fernandes
Dr.-Ing. Detlev Markus

Universität Hamburg
Prof. Dr. Mehtap Özaslan, PC

Universität Hannover
Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker, ITV
Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac, Prof. Dr.-Ing. Markus Richter, IFT
Dr. Raphael Niepelt, FKP

Universität Oldenburg
Prof. Dr. Michael Wark, TC

Innovationsbereiche

Das Landesgraduiertenkolleg ist thematisch in drei technologisch orientierte und einen fachübergreifenden Innovationsbereich gegliedert, welche in Abbildung 1 anschaulich dargestellt sind.

Im Innovationsbereich I „Synthese“ wird die Ammoniakherstellung auf Basis erneuerbarer Energien betrachtet. Zum einen wird ein neues Verfahren zur katalytischen Synthese nach dem Haber-Bosch-Prozess untersucht. Im Haber-Bosch-Verfahren wird Stickstoff mit Was-

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

TEN.efzn Forschungsplattform „Landesgraduiertenkolleg Wasserstoff und Wasserstoffderivat Ammoniak“

Fördermittelgeber:

Land Niedersachsen, Programm „zukunft. niedersachsen“ der Volkswagen Stiftung

Förderkennzeichen:

11-76251-2884/2024 (ZN4464)

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2024–30.09.2029

Projektleiter:in:

Prof. Dr. Mehtap Özasan (Sprecherin), Universität Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Thomas Turek (Sprecher, antragstellende Einrichtung), TU Clausthal

Prof. Dr.-Ing. Sabrina Zellmer (Koordinatorin), TU Braunschweig und Fraunhofer IST

Dr. Dana Schonvogel (stellvertretende Koordinatorin), DLR Institut für Technische Thermodynamik Oldenburg



Mehtap Özasan



Thomas Turek



Dana Schonvogel



Sabrina Zellmer

serstoff bei hohen Temperaturen und Drücken zu Ammoniak umgesetzt. Dabei muss zukünftig besonders das dynamische Reaktorverhalten infolge des fluktuierenden Betriebs der mit erneuerbaren Energien gekoppelten Wasserelektrolyse berücksichtigt werden, wofür sich die klassischen Ammoniakreaktoren jedoch nicht eignen. Daher wird im Innovationsbereich ein neues Reaktorkonzept experimentell und theoretisch untersucht, das sich sehr gut für einen dynamischen Betrieb eignet. Zum anderen wird die neuartige elektrochemische Synthese von Ammoniak betrachtet, die sich grundsätzlich bei sehr viel milderen Reaktionsbedingungen als das Haber-Bosch-Verfahren durchführen lässt. Dieser Prozess befindet sich jedoch noch im Stadium der Grundlagenforschung, da die Ammoniakausbeute und die erzielbare Effizienz noch sehr gering sind. Zudem werden Elektrokatalysatoren verwendet, die kritische Rohstoffe enthalten. Im Innovationsbereich sollen daher neuartige Katalysatoren mit verbesserter Aktivität und Selektivität entwickelt werden.

Im Innovationsbereich II wird die „Direktnutzung“ der chemisch gebundenen Energie des Ammoniaks in verschiedenen Anwendungen erforscht. Zum einen betrifft dies die Verbrennung von Ammoniak in Motoren oder in Kraftwerken zur Rückverstromung. Zum anderen lässt sich Ammoniak als Brennstoff in Brennstoffzellen einsetzen, die direkt elektrische Energie liefern. Bei der Verbrennung müssen die Zünd- und Verbrennungseigenschaften von Ammoniak näher untersucht werden. Da Ammoniak in reiner Form relativ ungünstige Verbrennungseigenschaften aufweist, ist auch die Verwendung von Mischungen aus Ammoniak und Wasserstoff sehr interessant. Besondere Beachtung muss dabei auch der Entstehung von Schadstoffen wie Stickstoffoxiden gewidmet werden. Die Rückverstromung von Ammoniak in Hochtemperatur-Brennstoffzellen ist bereits erfolgreich demonstriert worden, derartige Brennstoffzellen eignen sich jedoch auch zur Rückgewinnung von Wasserstoff, womit eine Anknüpfung an Innovationsbereich III gegeben ist. Die Verwendung von Ammoniak in Tieftemperatur-Brennstoffzellen, z.B. mit Polymerelektrolyten als Membran, befindet sich hingegen noch in einem frühen Stadium der Entwicklung.

Innovationsbereich III beschäftigt sich mit der „Rückgewinnung“ von Wasserstoff aus Ammoniak. Hierfür kommt die vollständige oder teilweise Zersetzung von Ammoniak zu Wasser-

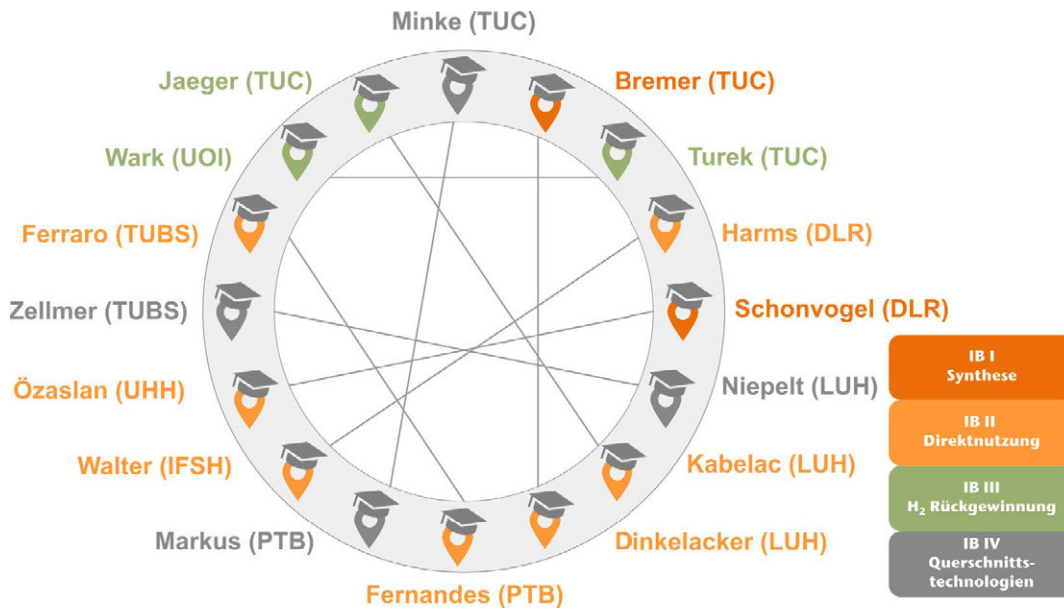


Abbildung 2: Betreuungstandems für die Promovierenden in den Teilprojekten.

stoff und Stickstoff an Katalysatoren in Frage. Anders als bei der Synthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren wird diese Reaktion thermodynamisch durch niedrige Temperaturen und Drücke begünstigt. Um eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit zu erreichen sowie das für viele nachfolgende Anwendungen gewünschte Druckniveau zu erreichen, sind bei technischen Prozessen sehr hohe Temperaturen erforderlich. Der Fokus der Forschungsarbeiten liegt in der Entwicklung verbesserter Katalysatoren, der Bestimmung reaktionskinetischer Daten und der Auslegung technischer Reaktoren. Darüber hinaus wird die Aufreinigung der entstehenden Produktgemische untersucht. Wie bereits erwähnt, ist die ebenfalls mögliche elektrochemische Umsetzung von Ammoniak zu den Elementen Gegenstand des Innovationsbereichs II. Zentrales Ziel des Innovationsbereichs IV „Querschnittstechnologien“ ist es, Aussagen über die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit von Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Ammoniak zu treffen. Dazu werden die verschiedenen Nutzungspfade entlang der gesamten Wertschöpfungskette, einschließlich sicherheitstechnischer Fragestellungen beim Umgang mit Ammoniak betrachtet. Auch ein Vergleich zwischen Ammoniak und anderen möglichen Wasserstoffderivaten (z.B. Methan, Methanol, LOHC, etc.) ist geplant, um die spezifischen Vor- und Nachteile von Ammoniak für bestimmte Anwendungsfelder transparent herauszuarbeiten.

Ausbildungskonzept und Vernetzung

Angesichts der räumlichen Verteilung der Forschenden auf die verschiedenen Standorte im Flächenland Niedersachsen muss der Vernetzung der Akteure besonderes Augenmerk gewidmet werden. Zentrales Element des Ausbildungskonzeptes im Landesgraduiertenkolleg ist das gemeinsame Betreuungstandem von zwei erfahrenen Forschenden aus sich fachlich ergänzenden Einrichtungen. Durch die gemeinsame Betreuung der Promovierenden werden die interdisziplinäre Zusammenarbeit, der wissenschaftliche Austausch und die individuelle Weiterentwicklung gestärkt. In Abbildung 2 ist eine Übersicht der Betreuungstandems für die insgesamt 16 Teilprojekte und Promovierenden in den vier Innovationsbereichen (IB) dargestellt.

Das Ausbildungsprogramm soll die fachliche Qualifikation der Promovierenden strukturiert vertiefen. Im Rahmen der Promotion müssen daher neben der Forschungsarbeit in den beteiligten Arbeitsgruppen zur Weiterbildung zusätzliche Leistungen erbracht werden, die nachfolgend zusammengestellt sind.

- Lehrveranstaltungen zu den Themen Sicherheit sowie Synthese und Handhabung von Wasserstoffderivaten, die das Fachwissen über Wasserstoff, Ammoniak und andere Wasserstoffderivate erweitern.

- Praktika in Laboren der Forschungseinrichtungen und der Industrie, um praktische Erfahrungen im Umgang mit Wasserstoff und Wasserstoffderivaten zu erlangen.
- Kurse zur Vermittlung eines effizienten Forschungsdatenmanagements.
- Veranstaltungen zu Softskills aus den bestehenden Graduiertenakademien der beteiligten Universitäten sowie des efzn zur Stärkung der überfachlichen Kompetenzen.

Teil des Programms sind weiterhin die Durchführung der regelmäßig stattfindenden Niedersächsischen Summer Schools zu „Brennstoffzellen und Batterien“ sowie „Wasserstofftechnologien“ mit dem Fokusthema Wasserstoffderivate. Für die praktische Ausbildung werden neben Experimenten an den jeweiligen Forschungseinrichtungen zudem Angebote aus der regionalen Industrie ermöglicht (u. a. über den Wasserstoff

Campus Salzgitter). Im Bereich der überfachlichen Kompetenzen wird ein gemeinsames Angebot mit der TEN.efzn Forschungsplattform „Sozialen Dynamiken für Energietransformation“ entwickelt. Insgesamt soll das Ausbildungsprogramm dazu beitragen, dass genügend Fachkräfte mit breiten fachlichen und überfachlichen Kenntnissen für die vielfältigen Herausforderungen bei der Transformation des Energiesystems in Niedersachsen und in Deutschland zur Verfügung stehen.

Literatur

- [1] M. Aziz, A. T. Wijayanta, A. B. D. Nandiyanto Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization *Energies* 13 (2020) 3062 <https://doi.org/10.3390/en13123062>.

TEN.efzn – Forschungsplattform „Wärme- IB I: Hochtemperatur-Großwärmepumpe“

Kurzfassung

Im Projekt TEN.efzn Wärme werden innovative Konzepte für die Integration von Großwärmepumpen mit neuartigen Phasenwechselmaterial-(PCM)-Speichern entwickelt. Ziel ist es, eine flexible und marktorientierte Betriebsweise zu ermöglichen, die Kosten senkt und die Integration erneuerbarer Energien verbessert. Am Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE) wird ein MILP-Optimierungsmodell zur Entwicklung strommarktbasierter Strategien erarbeitet und bereits in ersten Fallstudien getestet. Parallel dazu bereitet das Team die Entwicklung von Echtzeitmodellen vor, die künftig eine direkte Teilnahme der Wärmepumpen an Strommärkten wie Day-Ahead, Intraday und perspektivisch auch an Regelenergiemärkten ermöglichen sollen. Am Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik (IEVB) werden neue thermische Speicher auf Basis makroverkapselter Nanokomposit-PCM entwickelt. Diese thermischen Speicher erlauben eine optimale Anpassbarkeit an die Großwärmepumpen und eine Wärmespeicherung bis 200 °C mit hoher Speicherkapazität. Durch die Kombination von marktgeführtem Wärmepumpenbetrieb und innovativen PCM-Speichern entstehen neue Möglichkeiten für eine wirtschaftliche, flexible und netzdienliche Wärmebereitstellung in Fernwärmesystemen oder für Industrieprozesse.

Summary

The TEN.efzn Wärme project develops innovative concepts for integrating large-scale heat pumps with advanced PCM storages to enable flexible, market-oriented operation that reduces costs and enhances the integration of renewable energy. At the IEE, a MILP optimization model for developing electricity market-based operation strategies is under development and has already been tested in first case studies. In parallel, preparations are underway for real-time models that will enable direct participation of heat pumps in electricity markets such as day-ahead, intraday, and eventually ancillary service markets. At the Institute for Energy Process Engineering and Fuel Technology (IEVB),

new thermal storage systems based on macro-encapsulated nanocomposite PCMs are being developed. These thermal storage systems allow for optimal adaptability to large-scale heat pumps and heat storage up to 200 °C with high storage capacity. The combination of market-driven heat pump operation and innovative PCM storage creates new opportunities for economical, flexible, and system-friendly heat supply in district heating systems.

Motivation und Zielsetzung

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung erfordert neue Technologien, die sowohl eine effiziente und flexible Wärmeerzeugung ermöglichen als auch eine aktive Integration in den Energiemarkt erlauben. Großwärmepum-

Projektpartner

- Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz, Technische Universität Braunschweig
- Dr.-Ing. Wilhelm Tegethoff (Sprecher), Technische Universität Braunschweig
- Dr.-Ing. Nicholas Lemke, Technische Universität Braunschweig
- Prof. Dr.-Ing. Stephan Kabelac, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- Prof. Dr.-Ing. Stefan Holler (Sprecher), Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzmin-den/Göttingen
- Prof. Dr.-Ing. Erik Bertram, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzmin-den/Göttingen
- Prof. Dr.-Ing. Sebastian Föste, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzmin-den/Göttingen
- M.Sc. Maximilian Loth, Institut für Solarenergieforschung GmbH TP
- Dipl.-Ing. Peter Pärtsch, Institut für Solarenergieforschung GmbH TP
- Dipl.-Ing. Franziska Bockelmann, Steinbeis-Innovationszentrum energieplus

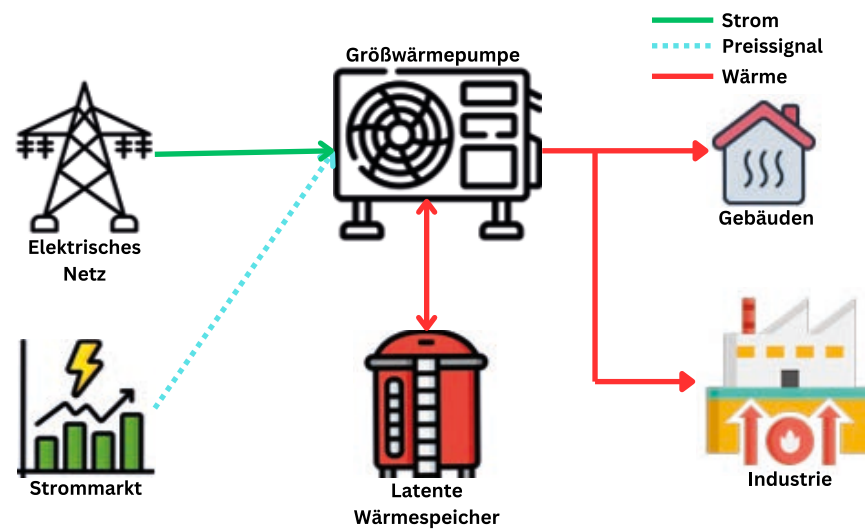


Abbildung 1: Strommarktgetriebener Einsatz von Großwärmepumpen.

pen sind hierfür eine Schlüsseltechnologie, da sie erneuerbaren Strom in nutzbare Wärme umwandeln können und durch ihren Betrieb eine direkte Kopplung zwischen Strom- und Wärmesektor herstellen. Damit sie aktiv auf die Preissignale des Strommarkts und Lastsignale reagieren können, ist die Kombination mit thermischen Speichern, mit maßgeschneiderter Speicherdynamik und Speicherkapazität, notwendig. Im Rahmen von TEN.Wärme wird daher ein integriertes Konzept entwickelt, bei dem die strommarktbasierende Betriebsführung von Großwärmepumpen am IEE mit der Entwicklung von innovativen PCM-Speichern am IEVB zusammengeführt wird.

Strommarktbasierter Betrieb von Großwärmepumpen

Am Institut für Elektrische Energietechnik und Energiesysteme (IEE) der TU Clausthal wird ein MILP-Optimierungsmodell entwickelt, das die technischen Eigenschaften der Wärmepumpen und die Bedingungen der Strommärkte abbildet. Erste Fallstudien zeigen, dass dadurch Kostenvorteile gegenüber einem rein lastgeführten Betrieb erzielt werden können und die Integration erneuerbarer Energien gestärkt wird. Das Modell wird fortlaufend weiterentwickelt und bildet die Grundlage für künftige Untersuchungen. Als nächster Schritt ist die Entwicklung von Echtzeitmodellen vorgesehen, die eine direkte Teilnahme an kurzfristigen Strommärkten und

perspektivisch auch an Regelenenergiemärkten ermöglichen sollen. Diese Arbeiten befinden sich in der Vorbereitung und bauen auf den bisherigen Erfahrungen aus dem MILP-Ansatz auf.

Entwicklung PCM-basierter thermischer Speicher

Am Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik (IEVB) der TU Clausthal wird ein Phasenwechselmaterial-(PCM)-Speicher entwickelt, der die notwendige Flexibilität für den marktgeführten Betrieb bereitstellen kann. Die besondere Herausforderung besteht in der Entwicklung und Flexibilisierung eines neuen thermischen Energiespeichersystems, das im Temperaturbereich von 70 °C bis 200 °C eingesetzt werden kann und insbesondere den Temperaturgleiteffekt von zweikomponentenbasierten Großwärmepumpen berücksichtigt. In diesem Zusammenhang werden makroverkapselte Nanokomposit-PCM entwickelt, die optimierte Phasenwechseleigenschaften und Wärmetransporteigenschaften aufweisen und in thermische Speichermodule integriert werden. Die Entwicklung kombiniert thermodynamisch-basierte Modellierung mit CFD- und DEM-Simulationen sowie das Design und den Aufbau von Laborprüfständen zur Validierung und Skalierung. Der thermische Speicher wird anhand der physikalisch basierten Simulation in ein reduziertes Modell überführt und in Modelica integriert. Im Verbund mit den Projektpart-

nern an der Leibniz Universität Hannover und dem ISFH wird ein gemeinsames Auslegungs- und Optimierungstool für das kombinierte thermische Energiesystem (Wärmepumpe und Speicher) entwickelt.

Zusammenspiel von Wärmepumpe und Speicher

Die Kombination aus marktgeführtem Wärmepumpenbetrieb und PCM-Speichern eröffnet neue Möglichkeiten für die Kopplung von Strom- und Wärmesystem. Während die Wärmepumpe die Preissignale des Strommarkts nutzt, ermöglicht der Speicher eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch. Dadurch können Kostensenkungen realisiert werden, indem Wärme in Niedrigpreisphasen erzeugt und in Hochpreisphasen bedarfsgerecht bereitgestellt wird. Zudem entsteht die Möglichkeit zur Bereitstellung von Flexibilität für Regelenergiemärkte, wodurch die Netzdienlichkeit erhöht wird. Darüber hinaus trägt die Integration von Wärmepumpe und Speicher dazu bei, den Anteil erneuerbarer Energien in der Wärmeversorgung zu steigern.

Ausblick

Mit der geplanten Inbetriebnahme der Prüfstände und der Weiterentwicklung der Modelle wird TEN.Wärme in den kommenden Jahren zeigen, wie Großwärmepumpen in Kombination mit innovativen PCM-Speichern wirtschaftlich betrieben werden können. Damit wird ein wesentlicher Beitrag zur Dekarbonisierung von Wärmenetzen und zur Kostensenkung durch Strommarktintegration geleistet.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Forschungsplattform „Wärme, Innovationsbereich I Hochtemperatur Großwärmepumpe“ im Verbundprojekt „Transformation des Energiesystems Niedersachsen (TEN.efzn)“

Fördermittelgeber:

Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) aus Mitteln des Programms „zukunft.niedersachsen“

Förderkennzeichen:

11-76251-2887/2024 (ZN4463)

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2024–30.09.2029

Sprecher:innen

Dr.-Ing. Wilhelm Tegethoff,
Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Stefan Holler, Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst
Hildesheim/Holzminden/Göttingen

Koordination

Dr.-Ing. Johannes Pelda, Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst
Hildesheim/Holzminden/Göttingen,
Dr. Stefan Bordihn, Institut für Solarenergieforschung GmbH

Projektteam:

Prof. Dr. Michael Fischlschweiger
Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Manisha Kabi, M.Sc.
Abhishek Verma, M. Sc.
Dr.-Ing. Jens zum Hingst



Michael Fischlschweiger



Ines Hauer



Jens zum Hingst

TEN.efzn - Transformation des Energiesystems Niedersachsen – Forschungsplattform Vertrauenswürdige Digitalisierung sicherheitskritischer Energiesysteme

Kurzfassung

Die Forschungsplattform „Vertrauenswürdige Digitalisierung sicherheitskritischer Energiesysteme“ untersucht aus technischer und soziologischer Perspektive, wie das Vertrauen der Endverbraucher in ein zunehmend dezentrales, digitales und automatisiertes Energiesystem gewährleistet werden kann. Besonderes Interesse gilt dabei lokalen Kooperationen von Energieverbrauchern und ggf. Energieerzeugern. Aus rechtlicher Sicht werden zum einen Möglichkeiten und Grenzen der Datennutzung bei Einsatz von Energiemanagementsystemen in einem Quartier untersucht. Zum anderen wird die Belastung von im Quartier erzeugtem und/oder bezogenem Strom mit Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen geprüft. Aus technischer Sicht werden die Möglichkeiten und Grenzen von KI-basierten Regelungsalgorithmen untersucht. Sie sollen es ermöglichen, das elektrische Netz als kritische Infrastruktur auch bei Kommunikations- und Datenverlust sicher weiter betreiben zu können.

Summary

The research platform “Trustworthy Digitization of Security-Critical Energy Systems” examines from a technical and sociological perspective how end users' trust in an increasingly decentralized, digital, and automated energy system can be ensured. Of particular interest are local cooperations between energy consumers and possibly energy producers. From a legal perspective, the possibilities and limitations of data use in the application of energy management systems in a neighborhood are being examined. In addition, the burden of grid fees, taxes, levies, and surcharges on electricity generated and/or purchased in the neighborhood is being examined. The technical possibilities and limitations of AI-based control algorithms are being investigated. These algorithms should enable the electrical grid, as critical infrastructure, to continue operating safely even in the event of communication and data loss.

Projekthintergrund

In dem bislang größten niedersächsischen Verbundprojekt „Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ (TEN.efzn) entwickeln Forschende an niedersächsischen Universitäten, Fachhochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie weitere Partner Lösungen für das Energiesystem der Zukunft. Gefördert wird das Verbundprojekt durch das Land Niedersachsen und die VolkswagenStiftung aus dem Programm zukunfft.niedersachsen mit insgesamt 58,2 Millionen Euro. Es umfasst sechs spezialisierte Forschungsplattformen sowie einen Transferbereich zur Förderung des Austauschs zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft.

Die Forschungsplattform „Vertrauenswürdige Digitalisierung sicherheitskritischer Energiesysteme“ untersucht hierbei aus technischer und soziologischer Perspektive, wie das Vertrauen der Endverbraucher in ein zunehmend dezentrales, digitales und automatisiertes Energie-

Projektpartner

- Technische Universität Braunschweig
- Technische Universität Clausthal
- Leibniz Universität Hannover
- Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt - Institut für Vernetzte Energiesysteme
- OFFIS - Institut für Informatik e.V.
- Soziologisches Forschungsinstitut Göttingen (SOFI) e. V. an der Georg-August-Universität Göttingen

system gewährleistet werden kann. Rechtliche Forschungsfragen befassen sich u.a. mit der Bereitstellung von Flexibilität in einem dezentralen Energiesystem und den Rollen der Akteure, insbesondere auch Energiegemeinschaften. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Datenverfügbarkeit für den sicheren und resilienten Betrieb des Energiesystems und neue Geschäftsmodelle sowie den Anforderungen an den Betrieb von Energiemanagementsystemen und die automatisierte Datenverarbeitung. Aus technischer Sicht werden die Möglichkeiten und Grenzen von KI-basierten Regelungsalgorithmen untersucht, um das elektrische Netz als kritische Infrastruktur auch bei Kommunikations- und Datenverlust sicher weiter betreiben zu können. Die jeweiligen Forschungsergebnisse aller Projektpartner werden abgeglichen und etwaiger Handlungsbedarf identifiziert.

Das Projekt wird an der TU Clausthal federführend von Prof. Hartmut Weyer für rechtliche und Prof. Ines Hauer für energietechnische Fragestellungen bearbeitet.

Energiemanagementsysteme

Ein Ziel des Projekts besteht darin, gemeinsam ein integriertes Vertrauensmodell zu modellieren, sozial zu reflektieren und technisch als Trust-Modell umzusetzen. Die Forschungsergebnisse sollen in ein Quartierenergiemanagementsystem eingebracht werden. Aus rechtlicher Sicht ist zu klären, welche Daten für die Umsetzung der Energiemanagementsysteme notwendig sind, welche Datenverarbeitungsvorgänge stattfinden und wie der erforderliche Datenzugang rechtlich gesichert werden kann. Dazu besteht eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe zur Entwicklung eines Energiemanagementsystem-Schnittstellen-Szenarios, welche District-, Quartier-, Building- und Home Energy Management Systeme umfasst und sich in der Phase der Szenarioentwicklung befindet. Hierbei werden bisherige Datenverfügbarkeitsbarrieren aufgedeckt und diese, soweit möglich, überwunden. Final sollen die Ergebnisse, sozial reflektiert, in einem Reallabor und in Feldtests angewandt werden, um Mehrwerte für künftige Energiekonzepte zur Quartiersenergieversorgung zu bieten.

Energiegemeinschaften

Im Energiesystem der Zukunft können lokale Kooperationen von Energieverbrauchern und

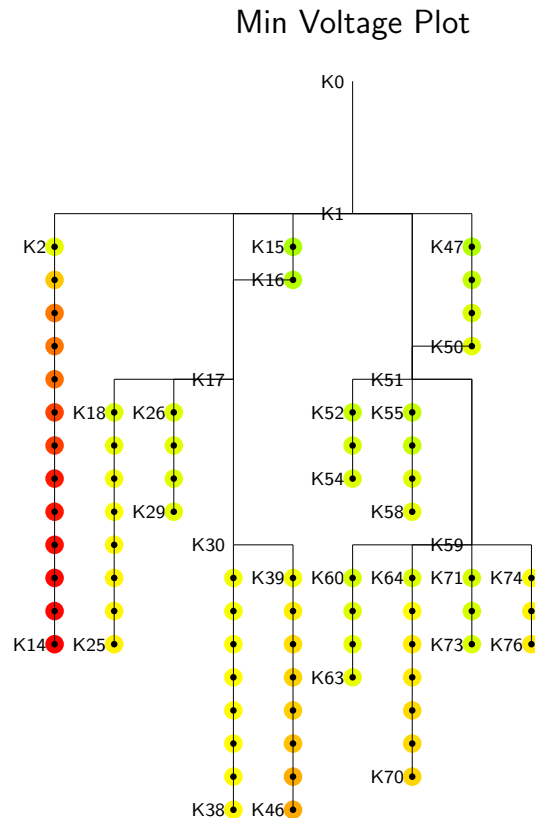


Abbildung 1: Niederspannungsverteilnetz mit markierten Spannungsproblemen (rot: Spannungsbandverletzung, grün: Spannungsnormalbereich).

ggf. Energieerzeugern, z.B. in Form sogenannter Energiegemeinschaften, eine zunehmende Rolle spielen. Die Entwicklung derartiger Kooperationen wird maßgeblich von den rechtlichen Rahmenbedingungen abhängen, insbesondere den damit verbundenen Pflichten und den anfallenden Kosten. Der bislang in Deutschland verfolgte Ansatz, lokale Leitungssysteme als sogenannte „Kundenanlagen“ von der Netzregulierung auszunehmen und damit auch kostenmäßig zu entlasten, steht aufgrund der jüngsten Rechtsprechung des Europäischen Gerichtshofs und des Bundesgerichtshofs in Zweifel. Quartierskonzepte und die Belastungen von dezentral erzeugten und an Dritte lokal weitergeleitetem Strom müssen daher überprüft und ggf. neue Lösungen entwickelt werden. Weitere Änderungen können sich aus der anstehenden Neuregelung der Stromnetzentgelte durch Festlegungen der Bundesnetzagentur ergeben.

Vor diesem Hintergrund wird untersucht, wie Quartiersversorgungskonzepte zukünftig aufgestellt werden können, um den Teilnehmern ggf. wirtschaftliche Vorteile zu gewähren, gleichzeitig aber auch das Potenzial von

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

Forschungsprogramm „Transformation des Energiesystems Niedersachsen“ (TEN.efzn)
Forschungsplattform „Vertrauenswürdige Digitalisierung sicherheitskritischer Energiesysteme“

Fördermittelgeber:

Gefördert mit Mitteln aus zukunf.t.nieder-sachsen, dem gemeinsamen Wissenschaftsförderprogramm des Niedersächsischen Ministeriums für Wissenschaft und Kultur und der VolkswagenStiftung.

Förderkennzeichen:

ZN4462

Laufzeit des Vorhabens:

01.10.2024–30.09.2029

Verantwortliche:r Teilprojektleiter:in

Prof. Dr.-Ing. Ines Hauer
Prof. Dr. Hartmut Weyer

Projektbearbeiter:

Hannes Hanse, M. Sc.
Dipl.-Jur. Bora Kocaoglu
Ass. iur. Jan Schlüpmann



Ines Hauer



Hartmut Weyer



Jan Schlüpmann



Bora Kocaoglu

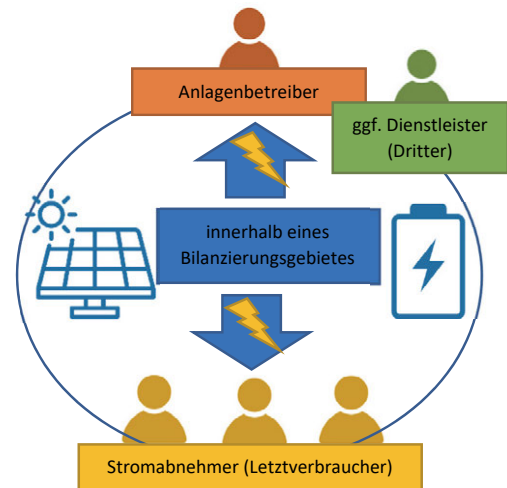


Abbildung 2: Darstellung relevanter Akteure in Energiegemeinschaften.

gemeinschaftlicher Energieversorgung zur Förderung netz- und systemdienlichen Verhaltens und der Akzeptanz der Energiewende zu heben. In einem ersten Schritt wird daher bewertet, inwieweit Quartierskonzepte nach der jüngsten Rechtsprechung noch Netzentgeltvorteile realisieren können. Für die Vielzahl möglicher Konstellationen im Quartier – von reinen Letztverbrauchern von Strom bis hin zu Prosumern mit PV-Anlage, Stromspeicher und Elektromobil – muss dazu die gegenwärtige Netzentgeltregulierung durchdacht werden. Zugleich sind Ausnahmen von der Netzentgeltregulierung einer Bewertung hinsichtlich ihrer rechtlichen Machbarkeit und tatsächlichen Umsetzbarkeit in Quartierskonzepten zu unterziehen.

Quartiersmodellierung

Das Institut für elektrische Energietechnik und Energiesysteme hat das Ziel, innovative Regelalgorithmen für regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT) zu entwickeln, die das integrierte Trust-Modell berücksichtigen. Der Algorithmus soll erweiterte Daten aus dem Quartiers- und Energiemanagementsystem der angeschlossenen Nutzer zur Bestimmung optimaler Stufenstellungen der rONT nutzen und Smart Meter Gateways zur Datenerfassung im Netz verwenden. Durch die Daten werden z.B. mögliche Lastflexibilisierungen (Anpassung von Wirkleistung durch Demand Response basierend auf dem Trustmodell) auf der Verbraucherseite berücksichtigt. Bei der Entwicklung der innovativen rONT Regelalgorithmen kommen zusätzlich Methoden der künstlichen Intelligenz zum



Abbildung 3: Kickoff-Meeting der Forschungsplattform im Februar 2025 in Oldenburg.

Einsatz, um auch bei Kommunikationsverlust zum QEMS und anderen Messpunkten effiziente Netzsteuerungen durch den regelbaren Ortsnetztransformator zu ermöglichen. Dazu wurde im ersten Projektjahr eine Umgebung zur Quartiermodellierung geschaffen, die es ermöglicht schnell unterschiedliche Niederspannungsverteilnetze zu entwickeln und szenarienbasiert elektrische Lasten (z.B. Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge, Haushaltslasten und deren Flexibilisierung) zu hinterlegen, die

elektrischen Größen zu berechnen und zu visualisieren. Abbildung 1 zeigt ein anonymisiertes Netzmodell, wobei die Farben den Spannungswert an dem Netzanschlusspunkt visualisieren (grün - Normalspannung bis rot - Spannungsgrenzwerte sind verletzt). Im nächsten Schritt werden konkrete Quartiersszenarien festgelegt. Desweiteren wurden geeignete KI-Methoden im Rahmen einer Literaturrecherche identifiziert und werden gerade auf ihre Eignung getestet.

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

Kurzfassung

Fünfeinhalb Jahre forschten mehrere Universitäten und Institute im Großprojekt „SiNED“ gemeinsam daran, wie Systemdienstleistungen in einem Energiesystem, das mehr und mehr von erneuerbaren Energien und deren Volatilität bestimmt wird, weiterhin sicher und zuverlässig erbracht werden können. Die Fragestellungen wurden aus Sicht der Ingenieur-, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften sowie der Informatik untersucht. Die rechtliche Analyse im Berichtszeitraum betraf die Mehrfachnutzung von Stromspeichern für unterschiedliche Einsatzzwecke sowie Fragen des Datenzugangs und Datenschutzes bei der Erbringung von Engpassmanagement- und Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge. Das Projekt endete im April 2025. Ausgewählte Ergebnisse wurden dem Fachpublikum des ETG Kongresses 2025 in Kassel präsentiert.

Summary

For five and a half years, several universities and institutes collaborated on the large-scale SiNED project to investigate how system services can be provided safely and reliably in a future energy system that is increasingly dominated by renewable energy sources and their volatility. The issues were examined from the perspectives of engineering, economics, law, and computer science. The legal analysis during the reporting period focused on the multiple use of electricity storage systems for different purposes, as well as issues of data access and data protection in the provision of congestion management and system services by electric vehicles. The project ended in April 2025. Selected results were presented to the expert audience at the ETG Congress 2025 in Kassel.

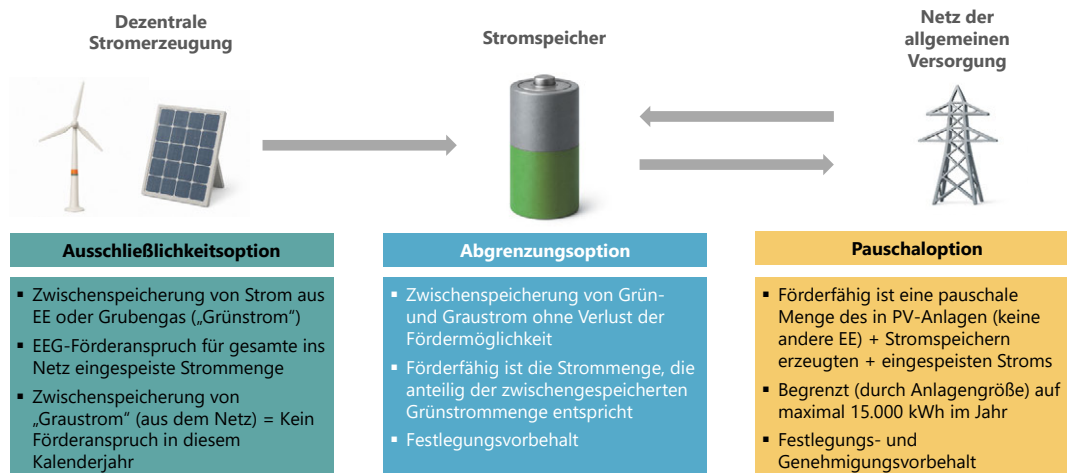
Überblick über die zweite Projektphase

Ende 2022 begann die zweite Phase des SiNED-Projekts. In dieser Phase wurden Fragestellungen aus der ersten Projektphase weitergeführt und vertieft. In drei Kompetenzbereichen forschten insgesamt neun Teilprojekte zum Umgang mit Prosumern, Speichern und Elektrofahrzeugen, der Bereitstellung und Koordination von Systemdienstleistungen und Engpassmanagement, Regelungstechnik und Schutzsystemen sowie Datenstrukturen und möglichen Angriffsszenarien. In rechtlicher Hinsicht lag ein erster Schwerpunkt auf den Anforderungen an die Datenverarbeitung bei der Erbringung von Systemdienstleistungen und Engpassmanagement-Dienstleistungen durch Elektrofahrzeuge. Insbesondere durch die Novellierung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III) ergeben sich dabei weitreichende Verpflichtungen zur Datenbereitstellung durch Fahrzeughersteller. Ein weiterer Schwerpunkt galt den rechtlichen Möglichkeiten zur Mehrfachnutzung von Lasten, um diese neben dem Engpassmanagement insbesondere auch für

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 – Institut für Wirtschaftsinformatik
- TU Clausthal – Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht

DAS AUSSCHLIEßLICHKEITSPRINZIP IN § 19 EEG – DREI NEUE OPTIONEN



Schematische Darstellung der drei neuen Optionen zur EEG-Förderung bei Zwischenspeicherung von Grünstrom

Abbildung 1: Schematische Darstellung der drei neuen Optionen zur EEG-Förderung bei Zwischenspeicherung von Grünstrom.

die Bereitstellung von Regelreserve einsetzen zu können. Schließlich wurden insbesondere die rechtlichen und finanziellen Hürden bei der Mehrfachnutzung von Stromspeichern geprüft.

Mehrfachnutzung von Stromspeichern

Ein zentraler Baustein für einen sicheren Netzbetrieb ist der Zubau und systemdienliche Einsatz von Stromspeichern. Das wesentliche Ziel ist, dass Stromspeicher für unterschiedliche Einsatzzwecke genutzt werden können, um die Wirtschaftlichkeit der Speicher zu verbessern und die Möglichkeiten der Stromspeicherung für den sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb nutzbar zu machen. Daher wurde im Berichtszeitraum näher untersucht, wie sich der gesetzliche Rahmen auf die Mehrfachnutzung von Stromspeichern auswirkt. Wichtige Fragen betrafen die Auswirkungen von Gesetzesänderungen im Verlauf des Projekts. Besonders relevant war der Wegfall der EEG-Umlage auf den Stromverbrauch, die durch eine Finanzierung aus staatlichen Mitteln ersetzt wurde. Darüber hinaus wurde die neue Regelung im Energiefinanzierungsgesetz analysiert, die Doppelbelastungen mehrfachgenutzter Speicher durch die KWKG-Umlage und die Offshore-Netzumlage verhindert. Mehrfach geändert wurde zudem das Ausschließlichkeitsprinzip für die Förderung von zwischengespeichertem Strom nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (§ 19 EEG). Die Mehrfachnutzung von Stromspeichern wurde bis zum Jahr 2024 durch das sogenannte Ausschließlichkeitsprinzip nach § 19

EEG (alte Fassung) gehemmt, wonach ein EEG-Förderanspruch für zwischengespeicherten Strom nur bestand, wenn in dem Stromspeicher ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien oder Grubengas (förderfähige Energieträger) zwischengespeichert wurde, nicht aber bei einer Mischnutzung zur Speicherung von Strom aus förderfähigen und nicht förderfähigen Energieträgern. Die Regelung wurde in einem ersten Schritt durch das Solarpaket I vom Mai 2024 geändert. Die Anpassungen betrafen sowohl die simultane Mischnutzung in dem Sinne, dass Energie aus förderfähigen und nicht förderfähigen Energieträgern zeitgleich gespeichert wird, als auch die sequenzielle Mischnutzung von förderfähigen und nicht förderfähigen Energieträgern. Die Neuregelung wurde im Rahmen des Projekts einer ersten Bewertung unterzogen und offene Fragen herausgearbeitet. Diese betrafen u.a. die erforderliche Detailausgestaltung durch zusätzliche Festlegungen der Bundesnetzagentur.

Noch bevor die Neuregelungen des Solarpakets I überhaupt Anwendung finden konnten, unterzog der Gesetzgeber § 19 EEG einer weiteren Novellierung, welche einige der diskutierten Problemstellungen adressieren und die Regelungen für Stromspeicher praktikabler machen sollte. Von besonderem Interesse war dabei die Schaffung einer „Pauschaloption“ für kleinere Prosumer. Damit können diese zukünftig ohne komplexe Abgrenzungs- und Abrechnungsfragen von einer EEG-Förderung auch bei Mischnutzung ihrer Stromspeicher profitieren. Diese Option steht allerdings noch

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

Laufzeit des Vorhabens:

1. Projektphase 01.11.2019–31.10.2022 +
2. Projektphase 01.11.2022–30.04.2025

Berichtszeitraum:

01.01.2024–30.04.2025

Projektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

Projektbearbeiter:innen:

Dipl.-Jur. Alexandra Scheunert
Ass. iur. Jan Schlüpmann



Hartmut Weyer



Jan Schlüpmann



Alexandra Scheunert

unter zweifachem Vorbehalt: Einerseits bedarf es einer Konkretisierung durch Festlegung der Bundesnetzagentur, andererseits einer beihilferechtlichen Genehmigung durch die Europäische Kommission. Auch diese erneute Novellierung aus dem Februar 2025 wurde einer ersten Bewertung unterzogen und die Ergebnisse auf dem ETG Kongress 2025 präsentiert.

Weiterer Gegenstand der Untersuchung war die erstmalige Gleichsetzung von Ladepunkten und Stromspeichern für die Zwecke der EEG-Förderung nach § 19 EEG. Mit diesem Ansatz sollen Potenziale des sogenannten „bidirektionalen Ladens“ erschlossen werden, bei dem Elektrofahrzeuge Strom nicht nur aufnehmen, sondern auch wieder abgeben. Die Gleichsetzung von Ladepunkten und Stromspeichern erleichtert diese bidirektionale Nutzung, indem bei der EEG-Förderung nicht an das einzelne Fahrzeug, sondern an den Ladepunkt angeknüpft wird. Die danach künftig denkbaren wirtschaftlichen Optimierungen in der Nutzung von Stromspeichern und Ladepunkten wirft interdisziplinär spannende Fragestellungen auch auf Haushaltskundenebene auf.

Literatur

Weyer / Scheunert / Schlüpmann: Das neue Ausschließlichkeitsprinzip der Stromspeicherung – Teil 1, EnWZ 2024, S. 408-413; Teil 2, EnWZ 2024, S. 447-450.

H2-Wegweiser Niedersachsen – Teilprojekt Energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen

Kurzfassung

Im dem Wasserstoff-Innovationslabor „H2-Wegweiser Niedersachsen“ wurde die Rolle Niedersachsens in der deutschen Wasserstoffwirtschaft analysiert und ein Szenario für ein nachhaltiges Energiesystem entwickelt und untersucht. Dabei wurden wesentliche Stufen der Wasserstoffwertschöpfungskette, nämlich Erzeugung, Speicherung und Konversion, betrachtet. Das Teilprojekt „Energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen“ untersuchte die Eignung des regulatorischen Rahmens zur Umsetzung des angestrebten Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft. Im Fokus des letzten Projektjahres standen die klimaschutzbedingten Anforderungen an Wasserstoff. Hierzu wurden die Wasserstoffstrategien Deutschlands und der EU sowie die rechtlichen Vorgaben für Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen und für sonstigen kohlenstoffarmen Wasserstoff analysiert.

Summary

The hydrogen innovation lab project “H2-Wegweiser Niedersachsen” analyzed Lower Saxony's role in the German hydrogen economy and developed and examined a scenario for a sustainable energy system. Essential stages of the hydrogen value chain, i.e. production, storage, and conversion were taken into account. The subproject “Energiewirtschaftsrechtlicher Rahmen” examined the suitability of the regulatory framework for putting into practice the desired ramp-up of the hydrogen economy. The last project year focussed on the requirements placed on hydrogen for the sake of climate protection. To this end, the hydrogen strategies of Germany and the EU as well as the legal requirements for hydrogen from renewable energy sources and for other low-carbon hydrogen were analyzed.

Wasserstoffstrategien Deutschlands und der EU

Das Projekt „H2-Wegweiser Niedersachsen“ wurde im August 2024 abgeschlossen. Im letzten Projektjahr standen die regulatorischen

Anforderungen im Fokus, die aus Klimaschutzgründen an die Treibhausgasintensität von Wasserstoff gestellt werden und für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft von besonderer Bedeutung sind. Hindernisse für den Wasserstoffhochlauf können sich insbesondere bei unnötigen oder divergierenden Anforderungen ergeben. Als Grundlage der regulatorischen Ausgestaltung wurden im Projekt zunächst die europäische und die nationale deutsche Wasserstoffstrategie untersucht.

Die Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) Deutschlands aus dem Jahr 2020, fortgeschrieben 2023, sieht aus Gründen der Nachhaltigkeit vorrangig die Nutzung „grünen Wasserstoffs“ vor. Hierbei wurde „grüner Wasserstoff“ in der NWS 2020 nicht allgemein als Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien definiert, sondern spezieller als Wasserstoff, der durch die Elektrolyse von Wasser hergestellt wird, wobei für die Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird. Wasserstoff aus Biomasse, der nicht elektrolytisch erzeugt

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)



Abbildung 1: Grundlagenpapiere der nationalen und europäischen Wasserstoffstrategie.

wird, war damit ausgeschlossen. Die Fortschreibung der NWS wiederholt diese Beschränkung allerdings mehr nicht ausdrücklich. Neben dem „grünen Wasserstoff“ berücksichtigt die NWS zumindest übergangsweise auch „kohlenstoffarmen Wasserstoff“ aus Abfällen oder Erdgas in Verbindung mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage – CCS). Die Wasserstoffstrategie der EU aus dem Jahr 2020 differenziert zwischen „erneuerbarem Wasserstoff“ und „CO₂-armem Wasserstoff“. Hierbei wird „erneuerbarer Wasserstoff“ definiert als Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser in einem mit Strom aus erneuerbaren Quellen betriebenen Elektrolyseur erzeugt wird, sowie nicht elektrolytisch erzeugter Wasserstoff biogenen Ursprungs. „CO₂-armer Wasserstoff“ hingegen umfasst fossilen Wasserstoff mit CO₂-Abscheidung und strombasierten Wasserstoff, bei dem die über den gesamten Lebenszyklus entstehenden Treibhausgasemissionen erheblich geringer sind als bei der derzeitigen Wasserstofferzeugung. Die europäische Wasserstoffstrategie priorisiert die Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff. Kurz- und mittelfristig wird jedoch auch CO₂-armer Wasserstoff als erforderlich angesehen.

Klimaschutzbedingte Anforderungen an Wasserstoff

Die Klimaschutzziele Deutschlands und der EU sind ein prägender Aspekt bei der Ausgestaltung des Rechtsrahmens für Wasserstoff. Von

der Treibhausgasintensität des Wasserstoffs hängen viele gesetzliche Privilegierungen ab. Diese betreffen u.a. die Netzentgelte.

Die rechtlichen Vorgaben verfolgen überwiegend – im deutschen Recht wie auch nach der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (RED III) – primär das Ziel, durch die verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien die Emission von Treibhausgasen von vornherein zu vermeiden. Eine Analyse des Rechtsrahmens zeigt allerdings, dass privilegierende Regelungen im Falle der Nutzung biogenen Wasserstoffs gewissen Einschränkungen unterliegen. Darüber hinaus erscheint zur Erleichterung des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft wünschenswert, zumindest die Anforderungen an Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivate in Form sogenannter RFNBO (Renewable Fuels of non-biological origin) möglichst einheitlich zu gestalten. Hierbei könnte die in einem schwierigen Einigungsprozess ausgehandelte Regelung für RFNBO im Verkehrssektor als Vorbild dienen. Die bisherige Rechtsentwicklung weist gleichfalls in diese Richtung.

Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass die derzeitigen Anforderungen für RFNBO im Rahmen weiterer Rechtssetzungsverfahren erneut angepasst werden. Hierbei wäre auch zu prüfen, ob großzügigere Anforderungen den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ohne Einbußen für den Klimaschutz zusätzlich unterstützen könnten. Im Rahmen des Projekts wurde daher in einem interdisziplinären Ansatz unter-

Rechtliche Relevanz der Treibhausgasintensität von Wasserstoff - Beispiele

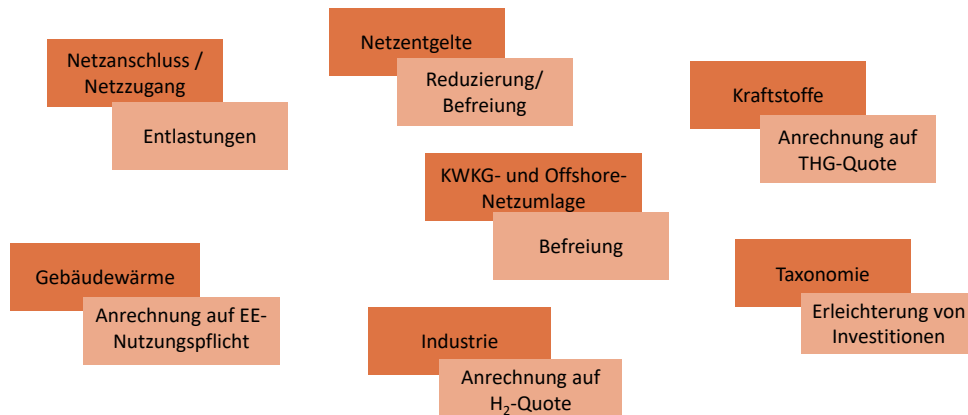


Abbildung 2: Rechtliche Relevanz der Treibhausgasintensität von Wasserstoff-Beispiele.

sucht, welchen Einfluss der energiewirtschaftliche Rahmen auf Wasserstoff-Geschäftsmodelle hat. Hierzu wurde die maßgebliche delegierte Verordnung (EU) 2023/1184 so charakterisiert, dass sie für eine ökonomisch-technische Bewertung handhabbar gemacht werden konnte.

In erheblichem Umfang sieht der europäische und deutsche Rechtsrahmen auch Privilegierungen für kohlenstoffarmen, nicht auf erneuerbaren Energiequellen basierenden Wasserstoff vor. Relevant ist dies einerseits für kohlenstoffarmen Wasserstoff auf Basis von Erdgas in Verbindung mit CCS oder CCU (Carbon Capture and Utilization), andererseits für kohlenstoffarmen, strombasierten Wasserstoff auf Basis von Kernkraft. Nach der europäischen wie auch der deutschen Wasserstoffstrategie sollen diese Regelungen als Übergangsregelungen angelegt sein, um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu fördern, bis hinreichende Mengen an Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energiequellen zur Verfügung stehen. Die entsprechenden Rechtsakte enthalten aber in der Regel keine derartigen zeitlichen Einschränkungen. Im Unionsrecht bestehen zwar teilweise Evaluierungspflichten, die aber nicht speziell auf das Verhältnis von Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energiequellen zu kohlenstoffarmem Wasserstoff abzielen. Auf eine längerfristige Bedeutung von kohlenstoffarmem Wasserstoff könnte etwa die besondere Berücksichtigung von Anlagen für erneuerbare wie auch kohlenstoffarme Gase in den europäischen Vorschriften zum zehnjährigen Netzentwicklungsplan für die Gasfernleitungsnetze hindeuten.

Die Untersuchung im Projekt kommt daher zu dem Ergebnis, dass eine zukünftig höhere Bedeutung von kohlenstoffarmem Wasserstoff auf Basis von CCS- bzw. CCU-Technologien nicht auszuschließen ist. Hierbei kann es, angesichts der unterschiedlichen energiepolitischen Präferenzen der Mitgliedstaaten, auf EU-Ebene und auf deutscher Ebene auch zu unterschiedlichen politischen Bewertungen kommen. Entsprechendes gilt für die Rolle von kohlenstoffarmem, strombasierten Wasserstoff auf Basis von Kernkraft. Bei der Ausgestaltung des Rechtsrahmens muss der Unionsgesetzgeber zudem das Recht der Mitgliedstaaten berücksichtigen, über die Wahl der Energiequellen selbst zu bestimmen. Soweit Privilegierungen für kohlenstoffarmen Wasserstoff vorgesehen werden, sollte aber jedenfalls geprüft werden, ob die bislang bestehenden unterschiedlichen Mindestschwellen für die Einsparung von Treibhausgasemissionen zur Erleichterung des Markthochlaufs vereinheitlicht werden können. Voraussetzung hierfür wäre eine Einigung auf das verfolgte Ambitionsniveau.

Als sinnvoll angesehen wurde im Projekt zudem eine kritische Prüfung rechtlicher Privilegierungen von „kohlenstoffarmem Wasserstoff“ nach Abschluss einer Markthochlaufphase. Bei der näheren Ausgestaltung einer solchen Prüfung sollte berücksichtigt werden, dass hinreichende Anreize für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft erhalten bleiben. Ein (schrittweises) Auslaufen rechtlicher Privilegierungen von „kohlenstoffarmem Wasserstoff“ würde im Übrigen ausreichende Erzeugungs- und Speicherkapazitäten und die Realisierung der erwarteten

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:

Gefördert im Niedersächsischen Vorab durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur und die Volkswagenstiftung

Förderkennzeichen:

ZN3770

Projektlaufzeit:

01.05.2021–31.08.2024

Berichtszeitraum:

01.01.2024–31.08.2024

Verantwortlicher Teilprojektleiter:

Prof. Dr. Hartmut Weyer

Projektbearbeiter:

Dipl.-Jur. Thore Iversen

Kostendegression bei der Erzeugung von Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energiequellen voraussetzen. Möglicherweise würde sich dieser dann bereits aufgrund wettbewerblicher Prozesse durchsetzen. Erst recht liegt schließlich die Überprüfung einzelner Regelungen nahe, die Privilegierungen für Wasserstoff sogar unabhängig von der Nutzung erneuerbarer Energiequellen oder der Reduktion der Treibhausgasemissionen vorsehen, z. B. bei den Netzentgelten oder bei der Stromsteuer für die Elektrolyse.



Hartmut Weyer



Thore Iversen

SALSA: Entwicklung applikationsspezifischer Aluminium-Ionen-Batterien unter Nutzung innovativer Passiv- und Aktivmaterialien

Kurzfassung

Die fortschreitende Elektrifizierung von Verkehr, Wärmeversorgung und Industrie erfordert leistungsfähige und nachhaltige Stromspeichertechnologien, die sowohl große Energiemengen speichern als auch durch Netzstabilisierung und Ausfallsicherung eine hohe Versorgungssicherheit gewährleisten. Aluminium-Ionen-Batterien (AIB) bieten hierfür großes Potenzial, da sie auf kostengünstigen, gut verfügbaren und umweltfreundlichen Materialien basieren und sich durch hohes Leistungspotential, Zyklenfestigkeit und geringen Wartungsaufwand auszeichnen. Ziel des Projekts SALSA ist die Entwicklung, Skalierung und Validierung optimierter Materialien und Komponenten für wiederaufladbare AIB-Systeme. Im Mittelpunkt stehen die kontrollierte Aluminium-Abscheidung, die Materialfunktionalisierung mittels Femtosekundenlasern sowie chemische Modifikationen zur Steigerung der elektrochemischen Performance. Besonderes Augenmerk gilt im EST zudem der umfassenden Charakterisierung und Modellbildung (ESB-, DFN-Modelle) sowie dem Aufbau eines Demonstratormoduls (12–24 V), das als zentrale Grundlage zur experimentellen Validierung dient. Durch praxisnahe Tests werden technologische Umsetzbarkeit, Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit eingehend bewertet und damit wesentliche Voraussetzungen für die Entwicklung einer nachhaltigen und technologisch souveränen Stromspeicherlösung geschaffen.

Summary

The progressive electrification of transportation, heating, and industrial sectors poses increasing demands on modern energy systems and calls for high-performance, sustainable energy storage technologies. These systems must not only enable the storage of large energy quantities but also ensure grid stabilization and supply reliability, particularly under dynamic load conditions. Aluminum ion batteries (AIBs) present a promising alternative to conventional storage

systems, as they are based on cost-effective, readily available, and environmentally compatible materials. Moreover, they combine high power performance and outstanding cycle stability with low maintenance requirements, making them particularly suitable for stationary applications. Within this context, the SALSA project aims to develop, scale, and validate optimized materials and components for rechargeable AIBs. Central research areas include controlled aluminum deposition, laser-based material functionalization, and targeted chemical surface modification using femto-second-pulse laser to enhance electrochemical performance. Key activities in EST encompass comprehensive electrochemical characterization, model development (ESB and DFN-model), and the design and experimental validation of a 12–24 V demonstrator module. By means of application-oriented testing, SALSA will assess technological feasibility, energy efficiency, and economic potential, thereby advancing sustainable and sovereign energy storage solutions.

Hintergrund

Die Sicherstellung einer zuverlässigen und klimaneutralen Stromversorgung stellt vor dem Hintergrund der fortschreitenden Elektrifizierung von Verkehr, Wärmeversorgung und industriellen Prozessen eine zentrale energiepolitische und technologische Herausforderung dar.

Projektpartner

- HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG
- Fraunhofer IISB, Freiberg
- Fraunhofer IAP, Potsdam
- TU Clausthal, EST
- TU Bergakademie Freiberg
- EL-CELL GmbH
- SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH
- IoLiTec Ionic Liquids Technologies GmbH

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

SALSA: Entwicklung applikationsspezifischer Aluminium-Ionen-Batterien unter Nutzung innovativer Passiv- und Aktivmaterialien

Fördermittelgeber:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE)

Förderkennzeichen:

03E14104C

Projektlaufzeit:

01.08.2025–31.07.2028

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengel
Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektbearbeiter:

Mingji Li, M. Sc.
Timo Ebel, B. Sc.



Ralf Bengel



Thomas Gimpel



Mingji Li



Timo Ebel

rung dar. Der damit einhergehende steigende Energiebedarf erfordert den verstärkten Einsatz leistungsfähiger und effizienter Stromspeichertechnologien. Neben der Speicherung großer Energiemengen – beispielsweise zum Ausgleich von tages- und jahreszeitlich bedingten Erzeugungsschwankungen – kommt insbesondere der Stabilisierung der Stromnetze eine herausragende Bedeutung zu. Hierzu zählen die Glättung von Lastspitzen sowie die Gewährleistung einer zuverlässigen Energieversorgung bei kurzfristigen Ausfällen, was vor allem im industriellen und gewerblichen Bereich von hoher Relevanz ist.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind neben den etablierten Speichertechnologien innovative, rohstoffeffiziente und kostengünstige Stromspeichersysteme erforderlich. Dabei müssen sowohl Aspekte der Rohstoffverfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit als auch Kriterien der ökologischen Nachhaltigkeit berücksichtigt werden. Zugleich gewinnt die Stärkung der technologischen Souveränität zunehmend an Bedeutung. Zukünftige Entwicklungen sollten daher darauf abzielen, Abhängigkeiten von internationalen Lieferketten zu verringern und gleichzeitig Konzepte einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft konsequent umzusetzen, um eine nachhaltige und resiliente Energieinfrastruktur zu fördern.

Funktionsweise und Projektziele

Die lithiumfreie Aluminium-Ionen-Batterie (AIB) beruht auf gut verfügbaren, kostengünstigen Rohstoffen mit Aluminium (Al) als Anode und Graphit als Kathode. Die AIB-Technologie weist aufgrund ihrer besonderen elektrochemischen Eigenschaften ein hohes Potenzial für langlebige, wartungsarme Anwendungen auf, etwa in den Bereichen Netzstabilisierung, Peak-Shaving oder unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV). [1, 2] In Laborsystemen wird eine spezifische Energiedichte von etwa 135 Wh/kg (bezogen auf das Aktivmaterial Graphit) erreicht. Für vollzellige Gesamtsysteme liegt die Energiedichte bei rund 50 Wh/kg, was in etwa dem Niveau von Nickel-Metallhydrid-Batterien (NiMH) entspricht. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Leistungsdichte von etwa 9 kW/kg (bezogen auf das Aktivmaterial Graphit) ordnet sich die AIB hinsichtlich ihrer Leistungsparameter zwischen Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien (LIB) ein. Im Projekt GridBatt wurde die Eignung eines AIB-Moduls für Netzstabilisierungsanwendungen getestet. [3-6]

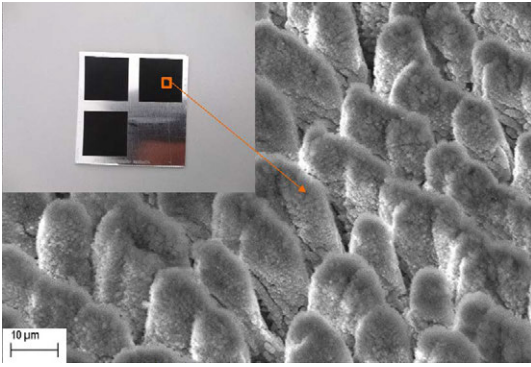


Abbildung 1: REM-Aufnahme strukturierter Al-oberflächen, bei 1000 Fach Vergrößerung

Ziel des Projekts SALSA ist die Entwicklung, Skalierung und Validierung neuartiger Materialien und Komponenten für wiederaufladbare Aluminium-Ionen-Batterien (AIB), die durch eine hohe Leistungsdichte, verbesserte Energieeffizienz und herausragende Zyklenfestigkeit charakterisiert sind. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Etablierung einer nachhaltigen, kosteneffizienten und technologisch souveränen Speichertechnologie für stationäre Anwendungen geleistet werden.

Darüber hinaus erweist sich die AIB als besonders umweltfreundliche Technologie, da sie ohne kritische Rohstoffe wie Lithium, Nickel, Mangan oder Kobalt auskommt und keine gesundheits- oder umweltrelevanten Stoffgruppen wie PFAS enthält. Somit wäre sie von einem potenziellen PFAS-Verbot in der EU nicht betroffen und stellt eine zukunftssichere Alternative zu bestehenden Batterietechnologien dar.

Zur Erreichung des Gesamtziels verfolgt das Projekt SALSA mehrere miteinander verknüpfte Teilziele. Erstens sollen durch gezielte Materialentwicklungen für Anode, Kathode und Elektrolyt die elektrochemischen Eigenschaften der AIB wesentlich verbessert werden. Im Fokus steht hierbei insbesondere die kontrollierte Aluminium-Abscheidung und -Auflösung, um eine gleichmäßige, dendritenfreie Al-Schichtbildung auch bei hohen Lade- und Entladeraten zu gewährleisten.

Im Rahmen der Materialfunktionalisierung werden die Elektroden Eigenschaften gezielt optimiert, um eine höhere Leistungsfähigkeit und Effizienz der AIB zu erzielen. Mithilfe von Femtosekundenlasern lassen sich die Oberflächenmorphologie, chemische Zusammensetzung, katalytische Aktivität sowie Benetzungs-, Fluid-

und Wärmetransporteigenschaften präzise einstellen. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Oberflächenmodifikation des Aluminium-Anodenmaterials mittels Ultrakurzpuls-Laser. Durch gezielte Strukturierung können die Oberflächen an die spezifischen Anforderungen der AIB angepasst werden, um deren elektrochemische Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz nachhaltig zu verbessern.

Darüber hinaus widmen sich weitere Untersuchungen der gezielten chemischen Modifikation der Elektrodenoberfläche durch Legierung mit Fremdelementen während des Laserprozesses. Dieses Verfahren ermöglicht eine kontrollierte Beeinflussung der katalytischen Aktivität, elektrischen Leitfähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Passivierung sowie des Alterungsverhaltens. Ziel ist es, das Aluminium an der Reaktionsseite zu aktivieren und gleichzeitig eine stabilisierende Passivierung auf der Rückseite zu erreichen.

Neben der Materialfunktionalisierung ist das EST im Rahmen des Projekts SALSA maßgeblich in die Weiterentwicklung der Aluminium-Ionen-Batterie (AIB) eingebunden. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der detaillierten Charakterisierung zur Modellbildung sowie auf dem Aufbau und der experimentellen Validierung eines Demonstratormoduls.

Zur Bewertung von Materialmodifikationen oder unterschiedlichen Stöchiometrien sind elektrochemische Charakterisierungstests auf Labor- oder Halbzellebene unerlässlich, weswegen auch die Ertüchtigung elektrochemischer Testzellen für die neuartige Zellchemie Teil der Projektaufgaben ist. Ergänzend dazu ermöglichen elektrochemische Modelle eine erweiterte Variationsmöglichkeit und eine präzisere Analyse der Wechselwirkungen einzelner Parameter auf das Gesamtzellverhalten. Mit Hilfe eines Modells der Vollzelle mit Berücksichtigung der anoden- und kathodenseitigen Teilreaktionsschritte sind darüber hinaus Parameter- und Sensitivitätsbetrachtungen auch ohne experimentellen Aufwand durchführbar. Im Rahmen des Projekts werden zwei komplementäre Ansätze verfolgt: Zum einen ein Ersatzschaltbildmodell (ESB), zum anderen ein Doyle-Fuller-Newman-(DFN)-Modell auf Zellebene, das eine örtlich aufgelöste Abbildung der Halbzellpotentiale erlaubt. Für das Hochskalieren auf Modulebene wird das weniger komplexe ESB-Modell verwendet, das sich zudem zur Simulation dynamischer Belastungsszenarien eignet.

Das Demonstratormodul wird mit einer Zielspannung von 12 bis 24 V konzipiert. Der Modulaufbau umfasst die mechanische Rahmenkonstruktion der Pouchzellen, das Kontaktierungskonzept, die Integration von Sensorik und Balancing sowie gegebenenfalls ein Temperaturmanagementsystem. Um das entwickelte AIB-System realitätsnah mit bestehenden Batteriesystemen zu vergleichen, erfolgt die Erprobung anhand praxisrelevanter Lastprofile typischer Hochleistungsanwendungen (z. B. USV) unter Berücksichtigung anwendungsspezifischer Normen und Richtlinien. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen eine fundierte Bewertung der praktischen Umsetzbarkeit des AIB-Systems und dienen zugleich der Fortschreibung des Verwertungsplans.

Durch die enge Verzahnung von Materialforschung, Zellentwicklung und Systemvalidierung schafft SALSA die Grundlagen für eine wettbewerbsfähige und ökologisch nachhaltige Aluminium-Ionen-Batterietechnologie. Das Projekt trägt somit wesentlich zur Technologiesouveränität und zur Bereitstellung eines sicheren, umweltfreundlichen Energiespeichers für zukünftige Stromversorgungssysteme bei.

Literatur

- [1] G. A. Elia, N. A. Kyeremateng, K. Marquardt, und R. Hahn, „An Aluminum/Graphite Battery with Ultra-High Rate Capability“, *Batter. Supercaps*, Jan. 2018, doi: 10.1002/batt.201800114.
- [2] J. Zhao u. a., „Toward the next generation of sustainable aluminumion batteries: a review“, *Green Chem.*, 2025, 27, 352-378, doi: 10.1039/D4GC04505J.
- [3] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG & FORSCHUNG, „GridBatt – Batterietechnologien zur Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs“. FKZ: 03XP0307.
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG & FORSCHUNG, „InnoBatt – Eine Batterie vom Material bis zum System neu denken“. FKZ: 03XP0492.
- [5] U. Wunderwald und M. Wassner, „Gehäuse zur Aufbewahrung einer Aluminiumchlorid aufweisenden ionischen Flüssigkeit sowie Batteriezelle mit einem solchen Gehäuse“, DE 10 2021 213 444 B3.
- [6] F. Jach, M. Wassner, R. Benger, und U. Wunderwald, „Upscaling aluminium-graphite batteries: from lab to an application relevant cell design“, gehalten auf der Advanced Battery Power Conference 2023, Aachen, Germany, 28. April 2023.

BLaserKat: Blasenablösecharakteristik und Langzeitstabilität von femtosekundenlaserlegierten Elektrokatalysatoren

Kurzfassung

Die fluktuierende Verfügbarkeit von Energie aus erneuerbaren Quellen über Tages- und Jahreszeiten hinweg erfordert zuverlässige und effiziente Speichertechnologien. Chemische Energiespeicher, insbesondere kohlenstoffbasierte Verbindungen sowie molekularer Wasserstoff, stellen aufgrund ihrer hohen Energiedichte eine langfristig tragfähige Lösung dar. Wasserstoff wird hierbei durch alkalische Elektrolyse von Wasser erzeugt, wobei als einziges Nebenprodukt molekularer Sauerstoff entsteht. Um die energetischen Verluste dieses Umwandlungsprozesses zu optimieren, richtet sich der Fokus auf die Optimierung der Elektrodenprozesse, die als limitierende Faktoren der Elektrolyse gelten. Das innovative Verfahren der Femtosekundenlaserlegierung ermöglicht eine präzise Strukturierung von Festkörperoberflächen und die Integration von Fremdelementen aus unterschiedlichen Phasen während des Herstellungsprozesses, was die katalytische Aktivität des Materials signifikant erhöht. Zudem führt die Oberflächenmodifikation zu einer verbesserten Ablösung der während der Elektrolyse entstehenden Gasblasen, wodurch überschüssige Überspannungseffekte reduziert werden. Ziel des vorliegenden Projekts ist die Validierung der Langzeitstabilität und Leistungsfähigkeit dieser neuartigen Elektroden sowie die

Analyse der Gasblasendynamik mittels einer eigens entwickelten, auf künstliche Intelligenz basierenden Softwarelösung.

Summary

The fluctuating availability of energy from renewable sources across daily and seasonal cycles necessitates reliable and efficient storage technologies. Chemical energy storage, particularly carbon-based compounds and molecular hydrogen, offers a long-term viable solution due to their high energy density. Hydrogen is produced via alkaline water electrolysis, with molecular oxygen as the sole byproduct. To optimize the energy losses of this conversion process, focus is placed on improving the electrode processes, which are considered the limiting factors of electrolysis. The innovative femtosecond laser alloying technique enables precise structuring of solid surfaces and the integration of foreign elements from different phases during the manufacturing process, significantly enhancing the catalytic activity of the material. Additionally, surface modification leads to improved detachment of gas bubbles formed during electrolysis, thereby reducing excess overvoltage effects. The aim of the present project is to validate the long-term stability and performance of these novel electrodes, as

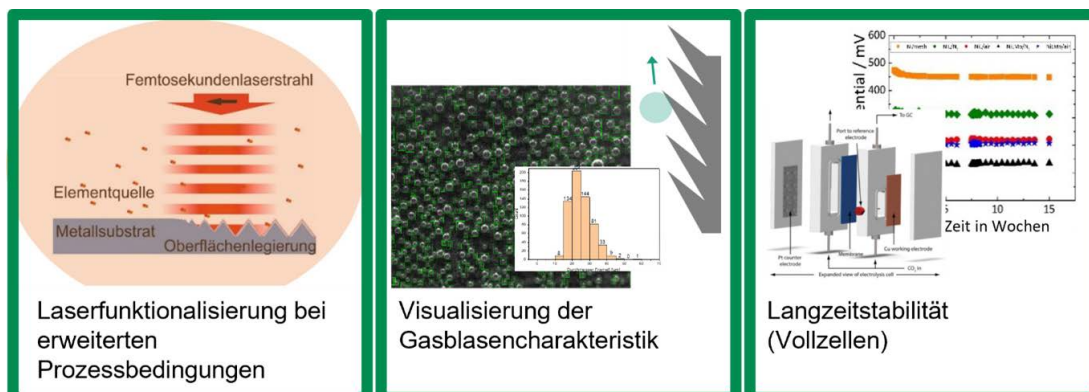


Abbildung 1: Visualisierung der BLaserKat Kernpunkte.

well as to analyze gas bubble dynamics using a specially developed artificial intelligence-based software solution.

Projektziele und Ansatz

Dieses Projekt zur Technologie der alkalischen Wasserelektrolyse setzt auf die Nutzung preiswerter, unedler Metallwerkstoffe wie Nickel, Molybdän und Eisen als Elektrodenmaterial. Im Vergleich zu edleren Metallen, wie Platin, zeigen diese Materialien jedoch höhere Überspannungen bei der Sauerstoff- und Wasserstoffentwicklung während des Umwandlungsprozesses, was sich negativ auf den Energieverbrauch auswirkt. Mithilfe gezielter Materialbearbeitung, beispielsweise durch die gezielte Legierung mit aktiven Katalysatorelementen oder durch spezielle Oberflächenmodifikationen, können diese energetischen Nachteile jedoch signifikant minimiert werden.

Hierfür wird im Projekt BlaserKat ein am EST entwickeltes Verfahren zur Femtosekundenlaser-Legierung von Elektroden eingesetzt (siehe Abbildung 1).

Dieses erlaubt es, in wenigen Prozessschritten sowohl eine kontrollierte Oberflächenvergrößerung durch Mikro- und Nanostrukturen als auch eine chemische Funktionalisierung mittels eingebrachter Legierungselemente zu erzielen. Die Bearbeitungsmethode basiert auf der präzisen Justage verschiedener Laserparameter, dem gezielten Einsatz von Prozessgasen sowie der Variation der Ausgangsmaterialoberflächen. Durch diese Parameter lässt sich entscheiden, der Einfluss auf wesentliche Eigenschaften der Elektrodenoberflächen nehmen, insbesondere auf die strukturelle und chemische Katalysatoraktivität, die Benetzbarkeit sowie die Fluidtransporteigenschaften, die maßgeblich die Leistungsfähigkeit von Elektrolyseuren bestimmen.

Auch der Gasblasentransport beispielsweise wird stark von der Oberflächenbenetzbarkeit beeinflusst. In der alkalischen Elektrolysezelle spielen darüber hinaus die Flüssigkeitsströmung, die Gasblasenentstehung, deren Verbleib auf der Oberfläche sowie die Ablöseprozesse eine zentrale Rolle für die Energieverluste des Systems.

Im Vorgängerprojekt FLEK (Femtosekundenlaserlegieren von Elektrokatalysatoren) konnte bereits gezeigt werden, dass Nickel-Molybdän-Legierungen auf der Wasserstoffseite sowie

Nickel-Eisen-Legierungen auf der Sauerstoffseite besonders vorteilhafte elektrochemische Eigenschaften aufweisen. In diskontinuierlichen, dreitägigen Testmessungen konnten Wasserstoffüberspannungen um bis zu 53 % gegenüber unlegierten, laserbearbeiteten Referenzelektroden reduziert werden.

Ziel von BLaserKat ist es also, diese Erkenntnisse auszubauen, die Elektrodenentwicklung und insbesondere die Stabilität und Langzeitperformance der laserlegierten Elektroden zu untersuchen sowie die Energieverluste zu minimieren.

Projektstand

Die Ergebnisse der Elektrodenentwicklung zeigen, dass durch die Anpassung diverser Laserparameter dichte Locharray-Muster (siehe Abbildung 2) erzeugt werden können, wobei die Materialstärke und Wahl der Laserparameter Lochabstand- und -qualität bestimmen.

Hierdurch werden 3D-Strukturen durch einfache Laserperforation gebildet, deren erste Visualisierungen zeigen, dass sie eine höhere Blasenablöserate besitzen als klassische flächenstrukturierte Oberflächen mit konischen Spitzen.

Dies weist darauf hin, dass die in den durch den Laserprozess erzeugten Tunneln lokal veränderte pH-Werte, Temperaturgradienten und Konzentrationsunterschiede einstellen, die gemeinsam mit einem verbleibenden Kissen-gas zu einer Begünstigung erleichterter Gasblasenbildung führen. Die fehlenden konischen Strukturen reduzieren zudem die Überspannungen. Eine Molybdänlegierung unter Stickstoffatmosphäre strukturiert erwies sich bei-

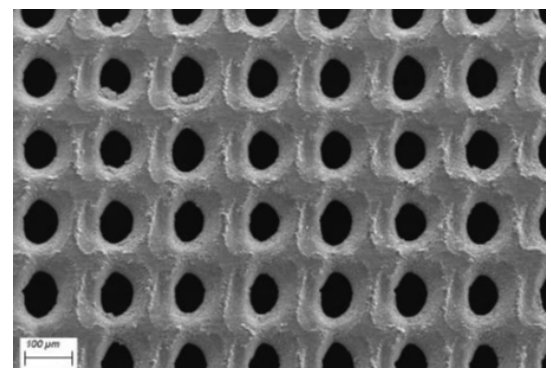


Abbildung 2: Visualisierung der BLaserKat Kernpunkte.

spielsweise besonders vorteilhaft mit geringster Überspannung von 135 mV.

Für die Langzeituntersuchungen stehen in-zwischen elektrochemische Messzellen mit angepasster Regeltechnik zur Verfügung, die einen kontinuierlichen und störungsfreien Betrieb über 100h ermöglichen. Erste Versuche wurden mit unlegierten, laserstrukturierten Elektroden durchgeführt und zeigten stabile Messbedingungen über die gesamte Laufzeit. Dies soll für laserlegierte Elektroden erweitert werden.

Für eine weitere Prozessoptimierung werden Gasblasenbildungs- und Ablöseprozesse systematisch analysiert. Hierfür wurde im Laufe des Projekts eine elektrochemische Visualisierungszelle konstruiert, mit der eine Beobachtung der Frontseite der Arbeitselektrode während eines laufenden Elektrolysebetriebs möglich ist. Realisiert wurde dies mittels Nickelnetz als Gegenelektrode sowie einer transparenten Membran in Zero-Gap Anordnung zur Arbeitselektrode, was zusätzlich dem Aufbau realistischer Stack-Geometrien eines industriellen Elektrolyseurs nahekommt.

Hiermit konnte eine direkte Beobachtung des Haft- und Ablöseverhaltens von Gasblasen ermöglicht werden, was bisher experimentell schwer zugänglich war.

In Kombination mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (siehe Abbildung 3) und der eigens entwickelten Software B.E.D. (Bubble Evolution Detector) können somit neu und einfach Gasblasencharakteristika wie die Entstehung, Wachstum und Ablösung automatisiert erfasst und quantitativ ausgewertet werden. Die auf Deep-Learning-Algorithmen basierende Software wurde kontinuierlich weiterentwi-

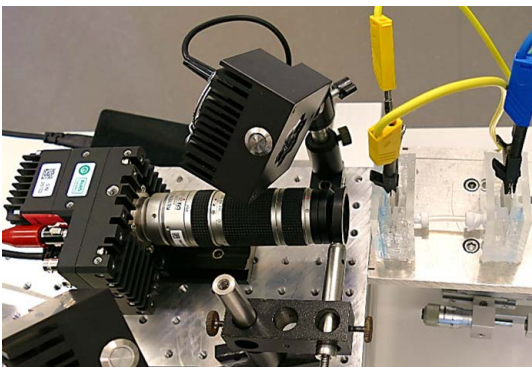


Abbildung 3: Beispiel: Aufbau Elektrolysezelle mit Hochgeschwindigkeitskamera.

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

BLaserKat: Blasenablösecharakteristik und Langzeitstabilität von femtosekundenlaserlegierten Elektrokatalysatoren

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Förderkennzeichen:

GI 1299/1-2

Projektlaufzeit:

01.07.2023–30.06.2026

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektmitarbeiter:innen:

Luise Hoffmann, M.S.

Viktor Hoffmann, M.Sc.



Luise Hoffmann



Thomas Gimpel



Viktor Hoffmann

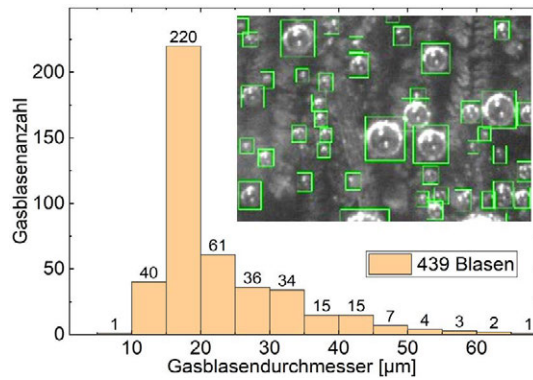


Abbildung 4: Visualisierung der Gasblasencharakteristik mittels B.E.D..

ckelt und zeichnet sich durch ein hohe Erkennungsrate und präzise Lokalisierungs Genauigkeit aus. Neben der Blasenerkennung können zudem Parameter wie beispielsweise Position, Durchmesser, Wachstumsgeschwindigkeit, Ablösezeit, Geschwindigkeit und Merge-Events berechnet und ausgegeben werden. Dieses Tool ist mittlerweile benutzerfreundlich erwei-

tert, frei zugänglich und wurde in einer Veröffentlichung dokumentiert. Ein Beispiel einer gasentwickelnden Elektrode mit Detektionsmarkierungen und zugehörigem Histogramm der ermittelten Abreißdurchmesser der Gasblasen ist hierzu in der Abbildung 4 dargestellt.

Diese Methodik ermöglicht neue Einblicke in die Korrelation zwischen Laserstrukturierung, Legierungszustand und Blasenablöseverhalten und trägt damit wesentlich zum Verständnis und zur gezielten Weiterentwicklung laserfunktionalisierter Elektroden für die Wasserelektrolyse bei.

Literatur

- [1] L. Lentz, D. Hüne, S. Handrich, C. Niems, T. Gimpel: "Bubble Evolution Detector B.E.D.-A Neural Network-Based Approach to Accurately Detect, Classify, and Evaluate Gas Bubbles Captured by A High-Speed Camera on Textured Surfaces", Journal of Open Research Software Vol 13 (2024).

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

Kurzfassung

Angeichts wachsender Anforderungen an Energieeffizienz und Nachhaltigkeit gewinnt die Optimierung von Plattenwärmeübertrager-Oberflächen, wie sie in Industrie, Energietechnik und Kühlsystemen eingesetzt werden, zunehmend an Bedeutung.

Im Projekt FemtoPlat wurde untersucht, wie Femtosekundenlaserstrukturierung Titan- und Edelstahloberflächen modifizieren kann, um die Wärmeübertragung sowie die Langzeitstabilität der Benetzungseigenschaften zu verbessern. Ziel war die effizientere Steuerung für zweiphasige Prozesse (Kondensation, Verdampfung). Dazu wurden Mikro- und Nanostrukturen sowie gezielt hydrophile (mit Hydroxylapatit(HA)) und hydrophobe (mit PTFE) Oberflächen mittels Laserlegierung erzeugt. HA-Titan-Proben zeigten dauerhaft superhydrophiles Verhalten und PTFE-Titan stabile Kontaktwinkel bis 149° über einen langen Zeitraum. Zudem wurden optische Untersuchungen zur thermischen Charakterisierung dieser Oberflächen durchgeführt. Hier zeigten laserstrukturierte Gräben eine deutliche, über zehnfach bessere Wärmeübertragung gegenüber unstrukturierten Proben aufgrund vorteilhafter Erhöhung der Keimstellenanzahl und -aktivität durch die vergrößerte Oberfläche.

Summary

In view of increasing demands for energy efficiency and sustainability, the optimization of plate heat exchanger surfaces, used in industries, energy technology, and cooling systems, is gaining growing importance. The FemtoPlat project investigated how femtosecond laser structuring can modify titanium and stainless steel surfaces to improve heat transfer and the long-term stability of wetting properties.

The objective was to enable more efficient control of two-phase processes (condensation, evaporation). For this purpose, micro- and nanostructures as well as specifically hydrophilic

(with hydroxyapatite) and hydrophobic (with PTFE) surfaces were created via laser alloying. HA-alloyed titanium samples exhibited permanently superhydrophilic behavior, while PTFE-alloyed titanium samples maintained stable contact angles up to 149° over an extended period. Additionally, optical investigations for the thermal characterization of structured surfaces were conducted. Laser-structured grooves demonstrated a significant improvement in heat transfer, more than ten times higher compared to unstructured samples, due to the advantageous increase in the number and activity of nucleation sites provided by the enlarged surface area.

Motivation und Ziele

Plattenwärmeübertrager (PWÜ) sind aufgrund ihrer kompakten Form und ihrer hohen Leistungsfähigkeit in zahlreichen industriellen Prozessen ein wesentlicher Bestandteil effizienter Energienutzung. Insbesondere bei Anwendungen mit organischen Arbeitsmedien oder Meerwasser wird das theoretische Potential dieser Technologie jedoch bisher nicht vollständig ausgeschöpft. Das liegt unter anderem darin begründet, dass der auf der Kältemittelseite entstehende Wärmewiderstand maßgeblich die Gesamtleistung limitiert.

Ansätze sind zum einen, das Strömungsverhalten der Fluide und den Initiierungsprozess bei der zweiphasigen Wärmeübertragung (Kondensation und Verdampfung) durch spezifische Anpassung der Oberflächengeometrie auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene zu steuern. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die wärmeübertragenden Oberflächen hinsichtlich ihrer Benetzbarkeitseigenschaften gezielt durch einen Ultrakurzpuls laserprozess zu funktionalisieren. Gerade die Langzeitbeständigkeit und Praxistauglichkeit laserstrukturierter metallischer Oberflächen, wie Titan und Edelstahl, stellen eine besondere Herausforderung dar, da die dauerhafte Einstellung der Hydrophilie bzw. Hydrophobie für den industriellen Einsatz unerlässlich ist. Denn ein zentrales

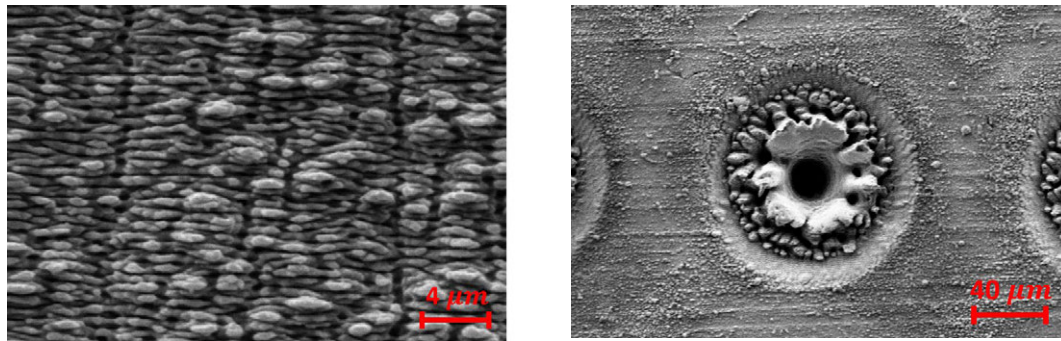


Abbildung 1: Beispiel strukturierter Titanoberflächen, (links) LIPSS, (rechts) Lochstruktur.

Problem ist, dass viele metallische Oberflächen nach der Laserbearbeitung zunächst ein superhydrophiles Verhalten aufweisen, dieses jedoch innerhalb weniger Tage durch Adsorption organischer Verbindungen aus der Atmosphäre in eine hydrophobe Charakteristik übergeht, wie es auch in der Literatur beschrieben ist [1, 2].

Ein Ziel des Projektes ist es daher, durch einen Laserstrukturierungsprozess robuste, leistungsfähige und anwendungsspezifische Wärmeübertrageroberflächen zu entwickeln, die eine verbesserte Wärmeübertragung bei gleichzeitig möglichst geringen Druckverlusten zu ermöglichen. Dadurch soll sowohl die Energieeffizienz der Technologie gesteigert als auch die Betriebskosten gesenkt werden. Zugleich soll die Langzeitstabilität der Benetzungseigenschaften der Metalloberflächen erreicht werden.

Hierzu kommt ein Ultrakurzpuls-Laser (Ti:Saphir) mit Pulslängen im Femtosekundenbereich zum Einsatz. Die extrem kurzen Wechselwir-

kungszeiten von etwa 10^{-15} s ermöglichen eine hochpräzise Materialablation bei minimalem Wärmeeintrag. Darüber hinaus können Fremd-atome als funktionelle Bestandteile durch einen Legierungsprozess in die Materialoberfläche eingebunden werden, wodurch sich die Materialeigenschaften gezielt anpassen lassen.

Aktueller Projektstand

Zur Erreichung des Projektziels wurden Titan (Grade 1) und Edelstahl (1.4404) mithilfe eines Ti:Sa-Femtosekundenlasers unter verschiedenen Gasatmosphären (N_2 , Ar, SF_6) mikro- und nanostrukturiert. Erfolgreich erzeugt wurden u. a. konische Spitzen, Mikrostifte, Rippen, Gräben und Lochstrukturen (Beispiele siehe Abb. 1), welche die effektive Oberfläche vergrößern und den Wärmeübergang verbessern.

Für eine langzeitstabile Benetzungseigenschaft wurde ein zweistufiger Laserprozess entwickelt,

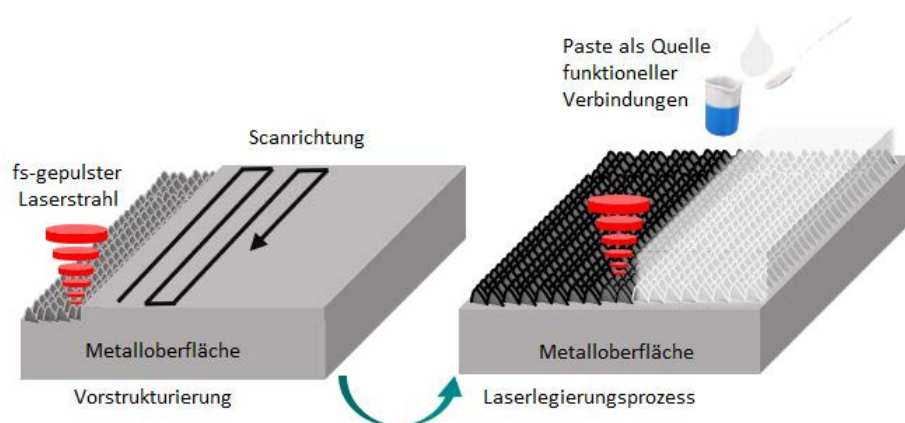


Abbildung 2: Der angewandte Laserstrukturierungsprozess mit (links) Vorstrukturierung und (rechts) Auftragen der funktionellen Paste mit Laserlegierung

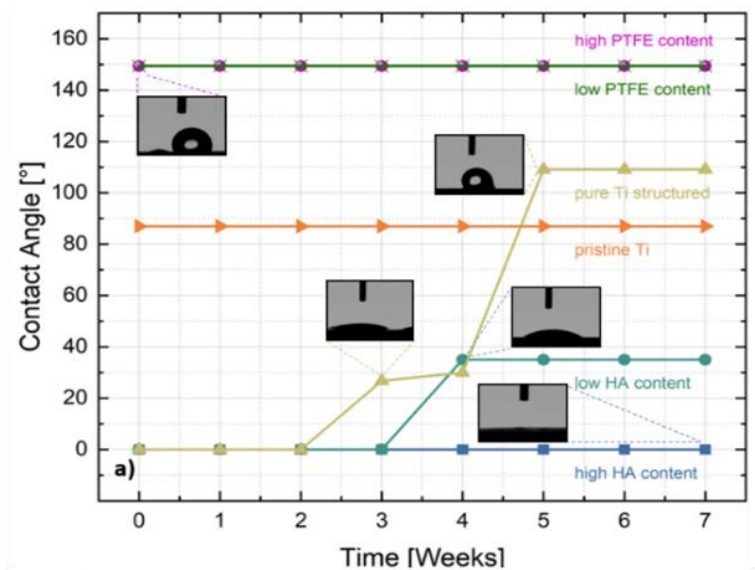


Abbildung 3: Erreichte Langzeitbenetzbarkeit der HA- und PTFE-legierten Titanproben.

bei dem funktionelle Pasten in die Materialoberfläche eingearbeitet wurden: Hydroxylapatit (HA) für Hydrophilie und Polytetrafluorethylen (PTFE) für Hydrophobie. Der Prozess beinhaltete eine Vorstrukturierung, das Auftragen der Paste sowie eine Nachstrukturierung mit optimierten Parametern mit praktikabler Prozesszeit (siehe Abbildung 2).

Die Oberflächen wurden mittels Oberflächenanalysen und Kontaktwinkelmessungen über sieben Wochen charakterisiert. Durch die legierten Titanproben mit HA entstand eine superhydrophile Oberfläche durch integrierte PO_3^- - und

HPO_2^- -Gruppen (siehe Abbildung 3). XRD- und ATR-IR-Analysen zeigen eine vollständige, jedoch amorphe Einlagerung. Bei Edelstahl mit HA wurde zwar kein konstanter Kontaktwinkel erreicht, jedoch konnte der Umschaltzeitpunkt von hydrophil zu hydrophob zeitlich nach hinten verschoben werden sowie die Prozessgeschwindigkeit dessen verlangsamt werden. Eine Zunahme der Rauigkeit durch größere Pulsanzahlen und Fluenzen führte zu einer weiteren Verbesserung dieses Verhaltens (Abbildung 4).

Im Gegensatz dazu wiesen die mit PTFE legierten Titan-Proben unmittelbar nach dem Prozess

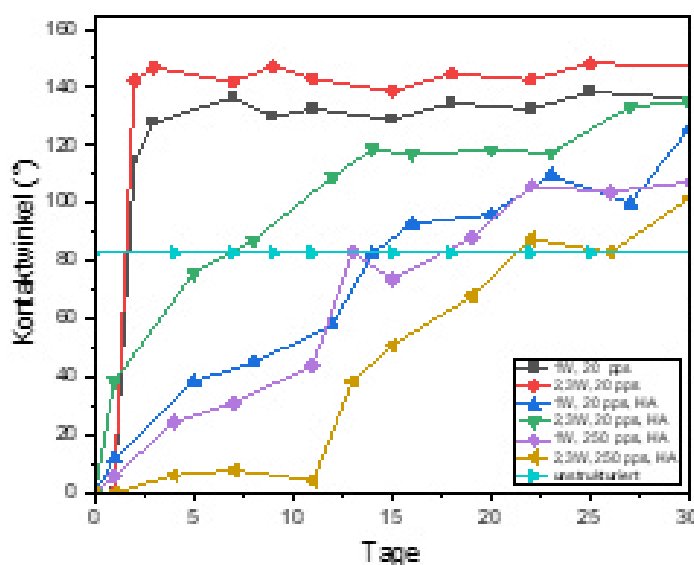


Abbildung 4: Verhalten des Kontaktwinkels für HA-legierte Edelstahlflächen für Hydrophilie bei Lagerung in Luft.

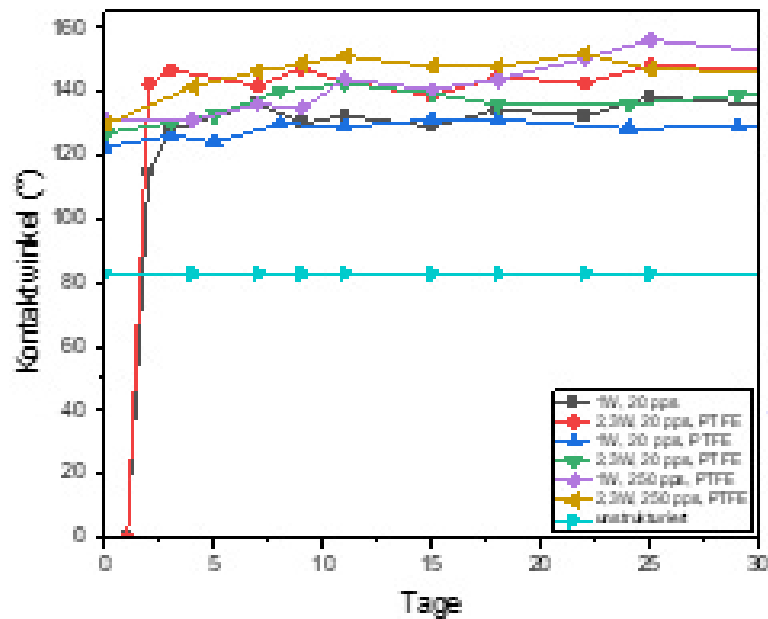


Abbildung 5: Verhalten des Kontaktwinkels für PTFE-legierte Edelstahloberflächen für Hydrophobie bei Lagerung in Luft.

einen stabilen Kontaktwinkel von 149° auf. Die in der PTFE-Paste enthaltenen F- und Si-Komponenten funktionalisierten die Oberfläche dauerhaft. C–F- und Si–O–Si-Bindungen verhinderten die Adsorption hydrophiler OH-Gruppen.

Ein wesentlicher Unterschied zu bisherigen Studien besteht darin, dass mit dieser Methode die gewünschten Benetzungseigenschaften nicht erst zeitverzögert auftreten oder wieder verloren gehen, sondern bereits direkt nach dem Laserstrukturierungsprozess dauerhaft vorhanden sind.

Bei Edelstahl und PTFE zeigt sich ein vergleichbares Verhalten: Die Proben sind von Beginn an hydrophob und behalten diese Eigenschaft langfristig bei (siehe Abbildung 5).

Durch die Nutzung höherer Laserleistungen und einer erhöhten Pulsanzahl, die größere Rauheiten erzeugen, konnten noch höhere Kontaktwinkel erreicht werden.

Zur thermischen Charakterisierung modifizierter Oberflächen wurde eine speziell entwickelte Messapparatur in Kombination mit einer

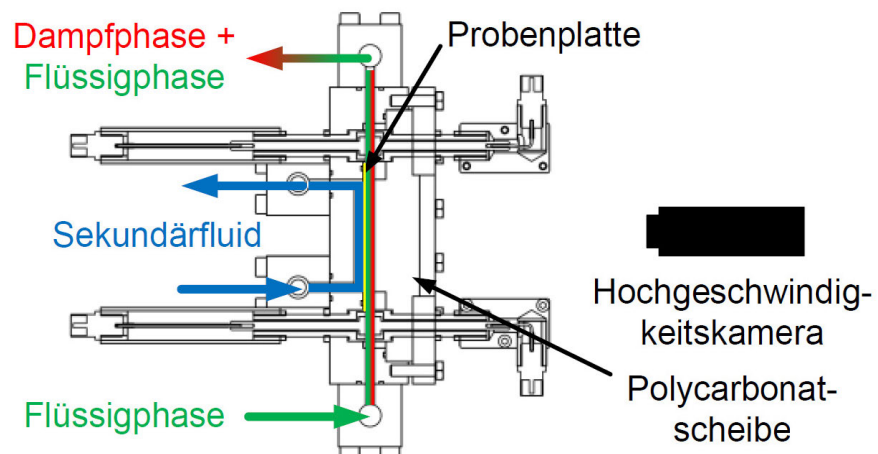


Abbildung 6: Messapparatur zur optischen Untersuchung von Phasenwechseln.

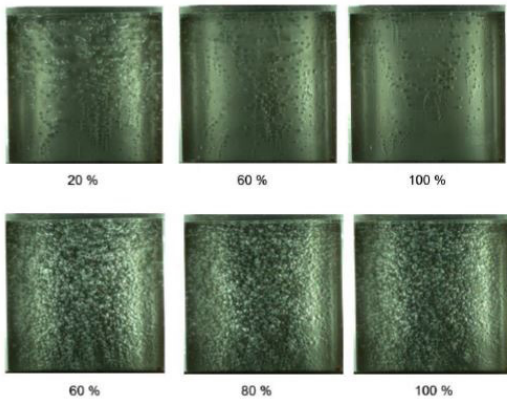


Abbildung 7: Bildaufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera bei verschiedenen Massestromdichten, Wasser 40°C, 1bar, R1336 Mzz(z); Edelstahl, (oben) PTFE-legiert, (unten) unlegiert, Gräben.

Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt (siehe Abbildung 6). Mittels einer neu programmierten Bildauswertung wurde der Wärmeübergangskoeffizient während des Phasenwechsels bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass laserstrukturierte Grabenstrukturen bei der Verdampfung eine bis zu zehnfach gesteigerte Wärmeübertragung gegenüber unstrukturierten Proben erzielen. Dies ist auf die erhöhte Anzahl und Aktivität großskaliger Keimstellen zurückzuführen, welche durch die vergrößerte effektive Oberfläche eine verbesserte Keimbildung ermöglichen (siehe Abbildung 7).

Ein direkter Zusammenhang zwischen Benetzbarkeit und Verdampfung konnte nicht festgestellt werden. Im Gegensatz dazu ist bei der Kondensation die Benetzbarkeit aufgrund des unterschiedlichen Wärmeübergangsmechanismus von größerer Bedeutung.

Literatur

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

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

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

Fördermittelgeber:

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

Förderkennzeichen:

GI 1299/2-1

Projektlaufzeit:

01.03.2021–28.02.2025

Projektkoordinator:

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

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Thomas Gimpel

Projektmitarbeiter:innen:

Mehmet Ali Gümüşkesen, M. Sc.
Mary-Jane Wacker, M. Sc.



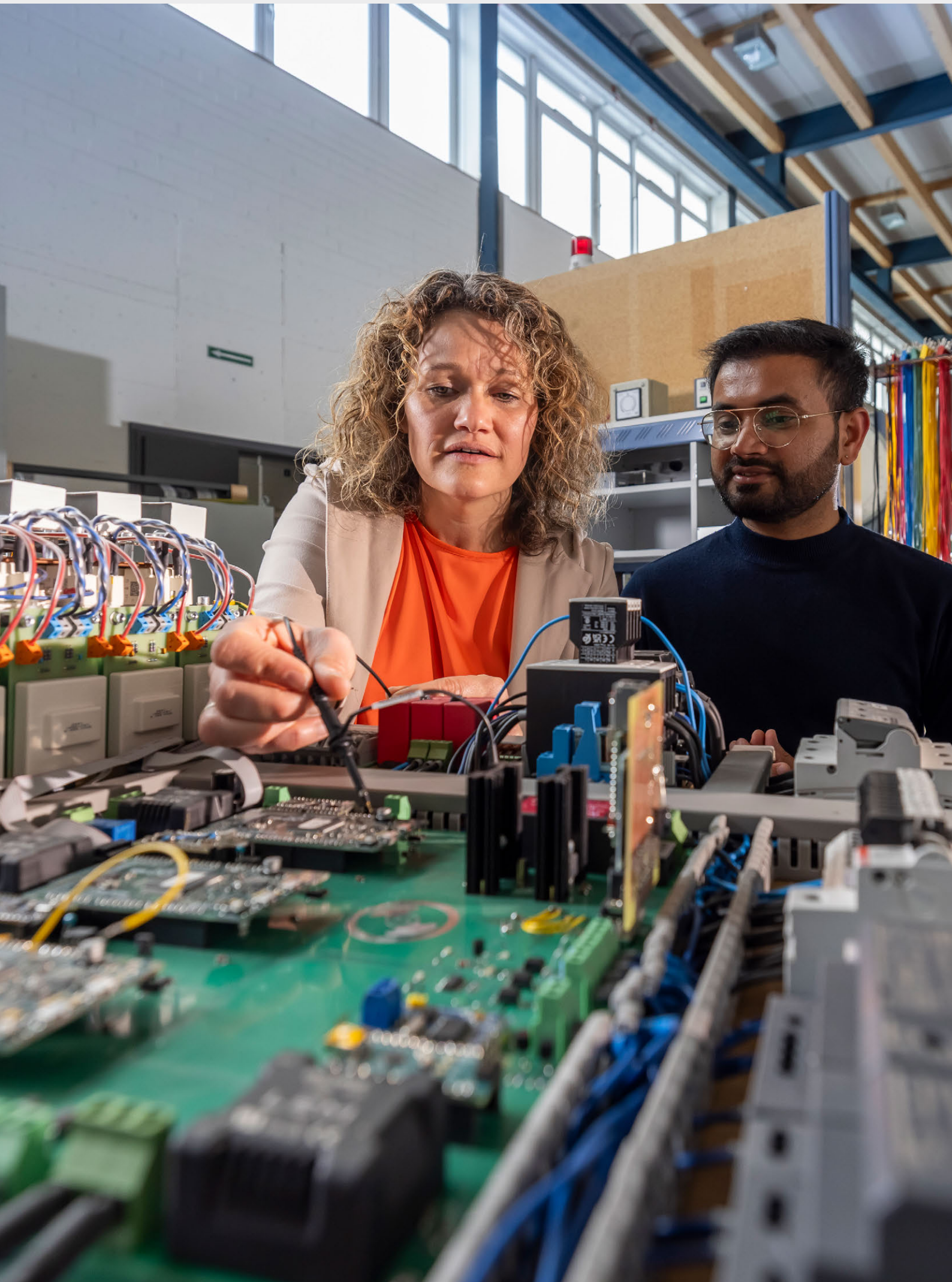
Thomas Gimpel



Mehmet Ali
Gümüşkesen



Mary-Jane Wacker





WISSENSTRANSFER IN DIE PRAXIS

LiBattFire: Lithium-Ionen-Batterien Feuer- und Gefahrenabwehr

Kurzfassung

Mit der zunehmenden Verbreitung von Batterietechnologien steigt statistisch auch die Zahl von Schadensfällen und Bränden. Besonders spektakuläre Lithium-Ionen-Batteriebrände werden von den Medien aufgegriffen und führen zur Verbreitung von Mythen, etwa der Annahme, solche Brände seien nicht löschbar. Um den zahlreichen Fragen zu solchen Havarien zu begegnen, haben die Freiwillige Feuerwehr Goslar und das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) der TU Clausthal das von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) geförderte Projekt LiBattFire initiiert. Ziel ist der Aufbau einer standardisierten Wissensbasis und deren Vermittlung an Einsatzkräfte, um Gesundheitsrisiken sowie Umweltbelastungen durch kontaminierte Einsatzmittel und Einsatzorte zu minimieren. Neben der direkten Brandbekämpfung werden auch Aspekte der Nachsorge, also der Umgang mit havarierten Batterieeinheiten nach dem Einsatz, behandelt. Zudem soll mit der Forschungsexpertise des EST aufgeklärt werden, welche Prozesse beim sogenannten Thermal Runaway (TR) im Inneren einer Zelle ablaufen und anhand welcher charakteristischen Signaturen sich erkennen lässt, dass eine Batterie am Brandgeschehen beteiligt ist.

Summary

With the growing market penetration of battery technologies, the number of related incidents and fires has likewise increased. The spectacular nature of lithiumion battery fires has attracted strong media attention, fostering myths – such as the belief that such fires cannot be extinguished – which have become entrenched in public perception. To address the many questions surrounding these incidents, the Volunteer Fire Department of Goslar and the Research Center Energy Storage Technologies (EST) at Clausthal University of Technology launched the LiBattFire project, funded by the German Social Accident Insurance (DGUV). The project aims to build a standardized knowledge base and train emergency personnel to respond appropriately to battery fires, minimizing health risk and envi-

ronmental impacts from contaminated firefighting agents and surroundings. It covers both direct fire suppression and postincident handling of damaged battery units. Leveraging EST's research expertise, the project also explains the processes involved in Thermal Runaway (TR) within lithiumion cells and identifies characteristic signatures indicating a battery's involvement in a fire.

Motivation

Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind in nahezu allen Lebensbereichen zu finden: Als Antriebsquelle für Elektrofahrzeuge, Heimspeicher neben Photovoltaikanlagen, in Werkzeugen, Notebooks und Mobiltelefonen. Hohe Sicherheitsstandards in der Zellfertigung sowie zell- und modulübergreifende Schutzeinrichtungen gewährleisten einen sicheren und zuverlässigen Betrieb moderner Batteriesysteme. Dennoch treten zunehmend Brandereignisse im Zusammenhang mit dieser Technologie auf. Ursachen solcher Havarien lassen sich in mechanische (z. B. Sturz, Kollision, Penetration durch Fremdkörper, etc. [1]), elektrische (z. B. Überladung, externer Kurzschluss [2]) und thermische Einflüsse [3] unterteilen. Ein missbrauchsbedingter Wärmeeintrag kann exotherme Zersetzungsreaktionen auslösen, deren freigesetzte Energie weitere Reaktionen antreibt. Durch diesen sich selbst verstärkenden Prozess – begünstigt durch interne Kurzschlüsse infolge des Versagens des Separators – kommt es schließlich zu einem unkontrollierten thermischen Durchgehen. Abbildung 1 zeigt den typischen Verlauf eines solchen TR und die Ausbreitung auf Modulebene, ausgehend von einem initialen Fehler einer einzelnen Zelle.

Die beim TR freigesetzten Verbrennungs- und Ausgasungsprodukte hängen von der vorhandenen Brandlast ab. Batteriezellen sind komplexe Multikomponentensysteme aus festen (Brandklasse A: Separatoren, Klebstoffe, Kunststoffummantelungen), flüssigen bzw. gasförmigen (Brandklassen B+C: Elektrolyt, Verdampfung ab ca. 100 °C) und metallischen Bestandteilen (Brandklasse D: Aktivmaterialien, Stromkollektoren, Metallgehäuse). Daher ist die

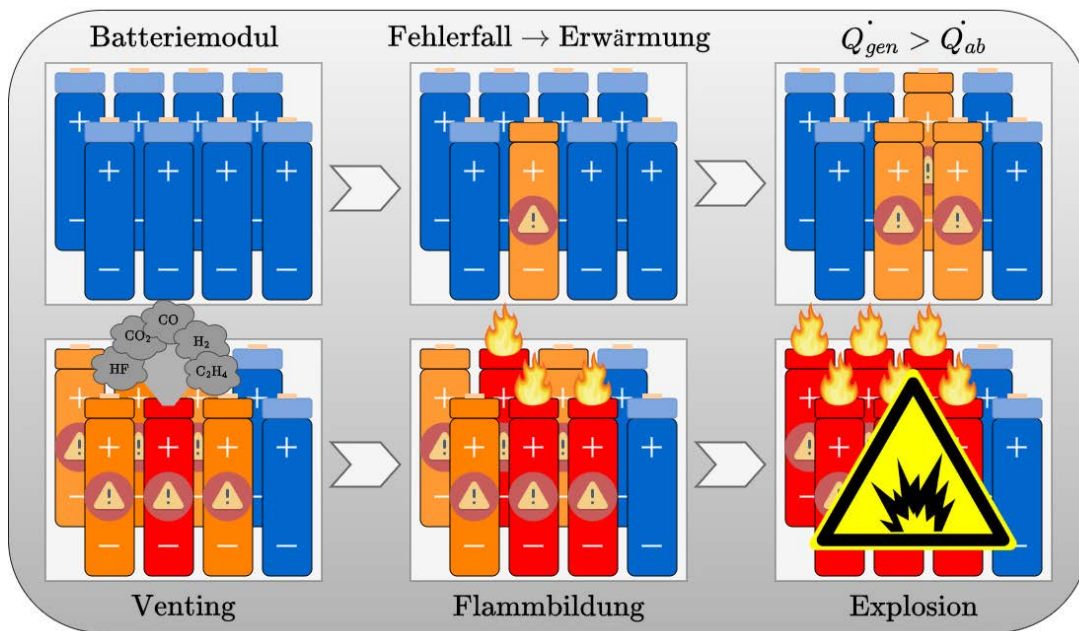


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des TR und der thermischen Propagation, ausgehend von dem Fehler einer einzelnen „Trigger-Zelle“, am Beispiel eines aus zylindrischen Zellen bestehenden Batteriemoduls.

Wahl geeigneter Löschmittel auf Basis der etablierten ABC-Systematik für Feuerwehren nicht trivial. Einsatzkräfte stehen durch den besonderen Brandverlauf und die damit verbundenen Gefahren – extreme Temperaturspitzen, toxische und teils brennbare Gase sowie Wiederentzündungsgefahr – vor neuen Herausforderungen. Weitere Probleme ergeben sich durch Kontaminationen der Einsatzumgebung und der persönlichen Schutzausrüstung (PSA), wodurch auch andere Beteiligte wie Schadenssanierer, Abschleppdienste und Berufsgenossenschaften betroffen sind. Um verzögerte Personenrettungen und Sachschäden zu vermeiden, ist wissenschaftlich fundierte Expertise erforderlich, um Entstehung, Verlauf und Auswirkungen von LIB-Bränden zu verstehen, geeignete Bekämpfungsmethoden zu entwickeln und konkrete Handlungsempfehlungen abzuleiten.

Ansatz und Projektziele

Die Grundlage des Projekts bildet eine umfassende Vorabrecherche zu praxisrelevanter Literatur. Dazu werden Merkblätter, Regelwerke sowie Einsatzempfehlungen öffentlicher Stellen herangezogen, die den aktuellen Stand der Technik widerspiegeln. Die gesammelten Dokumente werden in einer fortlaufend aktualisierten Wissensdatenbank archiviert, die insbesondere durch wissenschaftliche Publikatio-

nen mit systematischen Großbrandversuchen erweitert wird. Ziel ist die Bewertung etablierter und innovativer Einsatztaktiken.

Zur Erfassung des derzeitigen Wissensstands niedersächsischer Feuerwehren im Umgang mit havarierten LIB-Systemen wird eine Befragungsmethode eingesetzt, um Defizite, Unsicherheiten und Verbesserungsbedarf zu identifizieren. Mithilfe der Versuchseinrichtungen und Messtechnik des EST – in Synergie mit laufenden und abgeschlossenen Projekten – werden Gasemissionen und Partikelaustritte während des TR exemplarischer Batterien untersucht. In Verbindung mit Literaturdaten und Ergebnissen des Projektes „RiskBatt: Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase“ [4] sollen Hauptbestandteile des Rauchgases identifiziert werden, die mithilfe von ergänzender Messtechnik nachzuweisen sind, um Gesundheitsrisiken für die Einsatzkräfte zu minimieren.

Darüber hinaus wird ein Versuchsaufbau entwickelt, der den Kontaminationsgrad von PSA und Einsatzumgebung durch festgesetzte Schadstoffe bestimmt und bewertet. Hierzu werden in Abstimmung mit der Freiwilligen Feuerwehr Goslar reale Einsatzszenarien abstrahiert und als Randbedingungen (z. B. Abstand

Batterie-PSA, Zellchemie, Format, Energieinhalt, Auslösemechanismus, etc.) in den Versuchsaufbau integriert.

Der Wissenstransfer erfolgt kontinuierlich: Schulungsmaterialien werden fortlaufend erstellt und in den Ausbildungsbetrieb der Feuerwehren integriert. Ergänzend werden regelmäßig Workshops durchgeführt, um eine einheitliche Wissensbasis zu vermitteln und den Austausch zwischen Forschung und Praxis zu fördern.

Arbeitspakete und Projektstand

Die Sammlung praxisrelevanter Literatur zum Umgang mit LIB-Havarien basiert auf Veröffentlichungen der DGUV, der Arbeitsgemeinschaft der Leiterinnen und Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF), des Deutschen Feuerwehrverbands (DFV), der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (VFDB) sowie auf Einsatzhinweisen ausgewählter Automobilhersteller. Ergänzend wurden Studien zu systematischen Großbrandversuchen des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz (IBK) und der TU Graz berücksichtigt, um empirisch abgesicherte Daten einzubeziehen. Die Literatur wurde entlang der Themencluster „Gefahren“, „Erkennung“, „Löschmittel“, „Taktik“ und „Nachsorge“ analysiert.

Ein breiter Konsens besteht hinsichtlich der charakteristischen Signaturen eines LIB-Brandes: Die weiß-graue Rauchentwicklung entsteht durch Verdampfung des Elektrolyten und mitgeführter Graphitpartikeln, während schwarzer

Rauch auf Sekundärbrände von Kunststoffteilen, etwa im Fahrzeuginneren oder an der Bereifung batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV), hinweist. Akustische Signaturen – zyklische Zisch-, Pfeif- und Knackgeräusch – sowie die visuelle Beobachtung von Stichflammen, Funkenflug und ausgeworfenen Metallpartikeln sind ebenfalls typisch.

Technische Hilfsmittel wie Wärmebildkameras (WBK) ermöglichen die Überwachung des thermischen Niveaus einer Batterieeinheit und erlauben Rückschlüsse auf potenzielle sicherheitskritische Zustände. Zudem können sie in der Nachsorge eingesetzt werden, um eine Rückzündung infolge erneuter exothermer Reaktionen frühzeitig zu erkennen und eine Wiederentflammung zu verhindern.

Die Wahl eines geeigneten Löschmediums für havarierte LIB ist primär von der Kühlleistung abhängig, da jeder Auslöser – mechanisch, elektrisch oder thermisch – einen Wärmeeintrag verursacht, der die HTR-Schleife (engl. Heat-Temperature-Reaction [5]) und damit eine selbstverstärkende Kettenreaktion exothermer Zersetzungsprozesse begünstigt. Tabelle 1 zeigt eine kriteriengestützte Gegenüberstellung verschiedener Lösch- und Kühlmittel, deren Eignung im LIB-Brandfall kritisch bewertet werden muss. Wasser gilt, analog zu konventionellen Bränden als wirksamstes Löschmittel, sofern ausreichende Mengen (~200 l/min [6]) verfügbar sind. Es ermöglicht eine effektive Kühlung, Rauchgasniederschlagung, Verdünnung von Zersetzungsprodukten, Unterbindung des Luftsauerstoffkontakts und verhindert eine

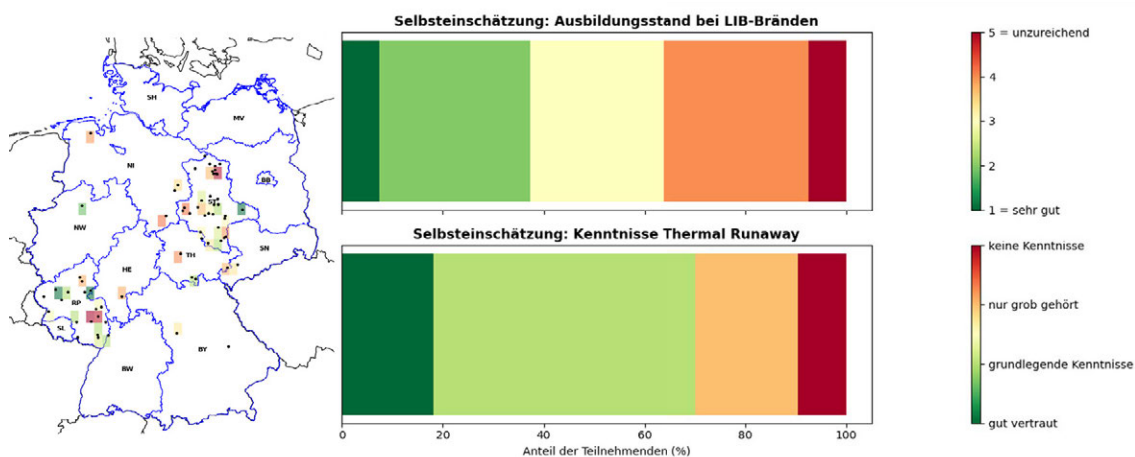


Abbildung 2: Deutschlandweites Einsatzaufkommen hinsichtlich Brandereignissen im Zusammenhang mit LIB (einschließlich BEV) (links). Gefühlte Unsicherheiten im Umgang mit LIB (rechts): Selbsteinschätzung zum derzeitigen Ausbildungsstand (oben), Selbsteinschätzung hinsichtlich des Kenntnisstands zum TR (unten).

Löschmittel	Wasser	Pulver	Inert- gas	Quarz- sand	Pyro- Bubbles	BBD
Kriterium						
Kühlwirkung	✓	✗	✗	(✓)	✓	✗
Erstickung	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓
Rauchgasreduktion	✓	✗	(✓)	✗	✓	✓
Rauchgasbindung	✓	✗	✗	✗	(✓)	✗
Kurzschlussgefahr	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓
Restspannung	✓	✗	✗	✗	✗	✗
Handhabung	(✓)	✓	(✓)	✓	✓	✓
Umweltbelastung	✗	✗	✓	(✓)	✓	✓
Löscherfolg (LIB)	✓	✗	✗	✗	(✓)	✗

Tabelle 1: Vor- und Nachteile ausgewählter Löschmittel: „✓“ = geeignet / vorteilhaft, „✗“ = ungeeignet / nachteilig, „(✓)“ = eingeschränkt geeignet / situativer Nutzen.

zellübergreifende Propagation. Herstellerseitig ausgewiesene Wassereintrittsöffnungen in Rettungsdatenblättern erleichtern die gezielte Einleitung des Kühlmediums. Die Bindung von Rauchgasen reduziert zudem die Kontaminationsgefahr für Einsatzkräfte. Empfohlen wird eine große Wurfweite (z. B. über ein Hohlstrahlrohr), um den Abstand zur Gefahrenzone zu maximieren.

Nachteile ergeben sich aus dem hohen Wasserbedarf sowie dem erschwerten Zugang zur Batterieeinheit durch hermetisch abgedichtete Zellen, Schutzgehäuse oder die Positionierung im Fahrzeugunterboden (BEV). Zusätzlich kann Lithium (in Lithium-Metall-Batterien oder Lithium-Ionen im Leitsalz des Elektrolyten) mit Wasser zu Wasserstoff („Knallgas“) reagieren. Zudem kann das standardmäßig eingesetzte Leitsalz Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) bereits bei Umgebungsfeuchtigkeit die Bildung von Fluorwasserstoff (HF) bewirken. Letzterer ist bereits in geringen Mengen hochtoxisch. Das kontaminierte Löschwasser (Rauchgase, Elektrolyt, Schwermetalle, etc.) stellt – insbesondere in Wasserschutzgebieten – eine erhebliche Umweltbelastung dar, weshalb Rückhaltemaßnahmen erforderlich sein können. Alternative Löschmittel wie Quarzsand, Pulver (ABC, BC, D) oder Inertgase (z. B. N₂, CO₂) sind mangels Kühlleistung ungeeignet. Eine reine Sauerstoffverdrängung ist wirkungslos, da Kathodenmaterialien auf Basis von Übergangsmetalloxiden (herkömmlich in LIB eingesetzt) im TR Sauerstoff freisetzen [7].

Brandbegrenzungsdecken (BBD) können Flammen und Schadgase temporär eindämmen und in kritischen Einsatzszenarien (z. B. in Tunneln oder Tiefgaragen) eine Evakuierung erleichtern. Ergänzende Werkzeuge wie eine Löschlanze

Daten zum Projekt

Vorhabensbezeichnung:

LiBattFire: Lithium-Ionen-Batterien Feuer- und Gefahrenabwehr

Fördermittelgeber:

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)

Förderkennzeichen:

FP483

Projektlaufzeit:

01.11.2024–30.04.2027

Projektleiter:

Dr.-Ing. Ralf Bengner

Projektbearbeiter:

Felix Buchheister, B. Sc.

Projektpartner:

Feuerwehr Stadt Goslar



Ralf Bengner



Felix Buchheister

oder ein Löschdorn ermöglichen eine punktuelle Kühlung und Rauchgasreduktion, ersetzen jedoch kein vollwertiges Löschmittel.

Zur Bewertung operativer Defizite wurde eine deutschlandweite Umfrage durchgeführt, um den aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand im Umgang mit LIB-Havarien zu erfassen. Als Multiplikatoren wurden im Wesentlichen die Feuerwehrunfallkasse (FUK) Niedersachsen sowie das Niedersächsische Landesamt für Brand- und Katastrophenschutz (NLBK) eingebunden. Bisher liegen etwa 135 auswertbare Datensätze vor, überwiegend von erfahrenen Führungskräften. Die Ergebnisse spiegeln valide, operative Erfahrungen wider. Anhand von ausgewählten, markanten Einsätzen konnten die Teilnehmenden gezielt die Randbedingungen (Anwendungsbereich, Brandstadium) sowie die Wahl und den Ablauf von Brandbekämpfungsmaßnahmen (Einsatztaktik, Ausrüstung, Verzögerungen) beschreiben. Zudem adressiert die Umfrage den Ausbildungs- und Kenntnisstand zu LIB-Havarien sowie Themen der Einsatzstellenhygiene und Dekontamination, um reale Einblicke in den Bereich Nachsorge zu gewinnen.

Die Zwischenauswertung zeigt, dass etablierte Kernmaßnahmen – etwa der Standard-Löschangriff mit Wasser und ergänzende visuelle Kontrolle per Wärmebildkamera (WBK) – bekannt sind und angewendet werden. In Sonderlagen (z. B. Tunnel, Tiefgarage) herrschen jedoch erhebliche Unsicherheiten. Abbildung 2 zeigt die Verteilung von Hotspot-Regionen früherer LIB-Brände (einschließlich BEV) sowie die wahrgenommenen Wissenslücken bezüglich des Verständnisses zum TR. Fehlende Routinen, eine mangelnde Standardisierung und unzureichende TR-Kenntnisse erschweren die Einsatzpraxis und unterstreichen den Bedarf an einheitlichen Handlungsempfehlungen und strukturierten Schulungskonzepten.

Literatur

- [1] H. Maleki und J. N. Howard, „Internal short circuit in Li-ion cells“, *J. Power Sources*, Bd. 191, Nr. 2, S. 568–574, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.02.070.
- [2] Y. Saito, K. Takano und A. Negishi, „Thermal behaviors of lithium-ion cells during overcharge“, *J. Power Sources*, Bd. 97–98, S. 693–696, Jan. 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00703-0.
- [3] E. P. Roth und D. H. Doughty, „Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells“, *J. Power Sources*, Bd. 128, Nr. 2, S. 308–318, Jan. 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.068.
- [4] J. Grabow, N. Orazov, S. Weineck und R. Benger, „Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase“, TU Clausthal, Schlussbericht, 2024.
- [5] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia und X. He, „Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review“, *Energy Storage Mater.*, Bd. 10, S. 246–267, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
- [6] Projektgruppe „Bergen von verunfallten Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen“, „Unfallhilfe und Bergen bei Fahrzeugen mit Hochvolt- und 48-Volt-Systemen – FAQ“, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Berlin, Report, Aug. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vda.de>.
- [7] D. D. MacNeil und J. R. Dahn, „The Reaction of Charged Cathodes with Non-aqueous Solvents and Electrolytes: I. Li_{0.5}CoO₂“, *J. Electrochem. Soc.*, Bd. 148, Nr. 11, S. A1205, Sep. 2001, doi: 10.1149/1.1407245.

EWAZ-Transfer - Transferprojekt zum Energie- und Wasserspeicher Harz



TU-Präsidentin Dr.-Ing. Sylvia Schattauer (links) nimmt von Melanie Walter, Niedersachsens Ministerin für Europa und Regionale Landesentwicklung, auf der Staumauer der Okertalsperre die Förderbescheide entgegen.

Im Herbst 2025 ist am EST ein Technologietransferprojekt für ein Verbundsystem gestartet, das die Themen Energiespeicherung, Hoch- und Niedrigwasserschutz, Trinkwassersicherung und Mehrfachnutzung bergbaulicher Infrastruktur vereint.

Die Energiewende wird nur mit großen Speichern für grünen Strom funktionieren. Zugleich stellt der Klimawandel mit zunehmenden Wetterextremen wie Hochwasser und Dürre die regionale Wasserwirtschaft vor immer größere Probleme. Angesichts dieser Herausforderungen muss der Energie- und Wasserspeicher Harz (EWAZ) mit seinen zahlreichen Talsperren fit für die Zukunft gemacht werden. Dieses Ziel verfolgt das Verbundprojekt „EWAZ-Transfer“, an dem neben der TU Clausthal vier weitere Hochschulen und fünf Wirtschaftsunternehmen beteiligt sind. Im Fokus dieses Projektes unter Federführung des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien steht der wissenschaftliche Know-how-Transfer aus der im Jahr 2022 abgeschlossenen wissenschaftlichen EWAZ-Vorstudie, um auf diese Weise gemeinsam mit den Partnern aus der Wirtschaft eine mögliche spätere Umsetzung vorzubereiten.

Das Verbundsystem mit energie- und wasserwirtschaftlich operierenden Kombikraftwerken

zur simultanen Nutzung der regionalen Energie- und Wasserressourcen des Westharzes verfolgt das Ziel, die Auswirkungen der durch den Klimawandel zunehmenden Extremwetterereignisse vorzubeugen und gleichzeitig die dafür notwendigen Bauwerke zur Daseinsvorsorge soweit möglich durch Erwirtschaftung von gegenseitigen Deckungsbeiträgen zu nutzen. Im Abschlussbericht des vorausgegangenen Forschungsprojektes wurden hierzu ein Katalog technisch möglicher Maßnahmen vorgeschlagen. Das jetzt bewilligte Transferprojekt greift den Systemgedanken im Zusammenspiel der verschiedenen Standorte auf und entwickelt daraus ein Leitprojekt zur Umsetzung eines Pilot-Kombikraftwerks.

Thematisch geht es um sog. Kombispeicherkraftwerke mit energie- und wasserwirtschaftlicher Funktion im Verbund. Derartige Bauwerke sind in der hier vorgeschlagenen Konzeption nicht nur im Westharz neu: Einerseits stellen sie eine Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel im Rahmen der Energiewende in Norddeutschland dar, andererseits dienen sie der Daseinsvorsorge durch integrierten Hoch- und Niedrigwasserschutz sowie der zusätzlichen Trinkwassergewinnung in den Zukunftsregionen Südost- und Südniedersachsen. Insbesondere werden dazu folgende Aspekte adressiert:



Das Projektteam beim Kickoff-Meeting auf dem EnergieCampus Goslar.

- Systemische Betrachtung der verschiedenen Standorte als kombiniertes energie- und wasserwirtschaftliches Verbundsystem
- Anpassung der energie- und wasserwirtschaftlichen Infrastruktur an den Klimawandel
- Konzeption und Voruntersuchung des ersten „Kombi-Kraftwerkes“ zur simultanen Nutzung in der nachhaltigen Energie- und Wasserwirtschaft
- Entwicklung, Ausführung, Simulation und Optimierung der Betriebsführung der Kombi-Kraftwerke im Verbund und Einzelbetrieb
- Erbringung von Systemdienstleistungen für Hoch- und Niedrigwasserschutz, Trinkwassergewinnung und Speicherung regenerativer Energien
- Berufliche und gesellschaftliche Bildung rund um das Thema (Stark-)Regenwasser, Dürremanagement und regenerative Energien

Das zu entwickelnde energie- und wasserwirtschaftliche Verbundsystem hat einen hohen Innovationsgrad und wird in enger Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern aus den Bereichen Wasser- und Energiewirtschaft bearbeitet. Diese unterstützen das Vorhaben durch eine integrative Mitarbeit sowie eine Mitfinanzierung, welches die hohe praktische wirtschaftliche Relevanz des Themas unterstreicht.

Der interdisziplinäre Projektverbund unter Federführung der TU Clausthal setzt sich aus den folgenden Partnern zusammen:

- TU Clausthal,
 - Forschungszentrum Energiespeichertechnologien mit dem
 - Department of Mining und Department of Geoscience des Institute of Geotechnology and Mineral Resources und der
 - Abteilung Energiesystemintegration des CUTEC Forschungszentrums
- TU Braunschweig
 - Leichtweiß-Institut für Wasserbau
 - Hochschule Ostfalia
 - Fakultät für Bau-Wasser-Boden, Suderburg
- Georg-August-Universität Göttingen
 - Institut für Politikwissenschaft
- Leibniz Universität Hannover
 - Institut für Umweltplanung
- Harzwasserwerke GmbH,
- Uniper Kraftwerke GmbH,
- Harz Energie GmbH & Co. KG,
- VGH Versicherungen,
- Öffentliche Versicherung Braunschweig

Das Projekt hat eine Laufzeit von zwei Jahren und verfügt über ein Gesamtvolumen von knapp 2,4 Mio. €. Davon wird knapp 1 Mio. € aus EFRE-Mitteln der beteiligten Zukunftsregionen gefördert, die übrige Finanzierung wird vorrangig von den beteiligten Industriepartnern erbracht.



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, das „Unternehmergegespräch ENERGIE“. Seit dem Jahr 2020 tritt das Forschungszentrum Energiespeichertechnologie (EST) der TU als Mitveranstalter auf. Die Reihe ist mittlerweile seit vielen Jahren als bedeutende Informations- und Austauschplattform für Akteurinnen und Akteure aus Unternehmen, Kommunen, Forschung und Zivilgesellschaft in der Region etabliert. Ziel ist es dabei stets geblieben, neueste Informationen zur ressourcenschonenden und wirtschaftlichen Nutzung von Energieträgern zu liefern, über Fördermöglichkeiten zu informieren und den fachlichen Austausch in der Region zu stärken.

Innovatives Element und weiterhin Alleinstellungsmerkmal der Veranstaltung ist die integrative Verknüpfung von (über-)regionaler Expertise und praktischer Erfahrungen von Fachleuten aus Unternehmen, Wirtschaftsförderung, Verwaltung, Fachagenturen und Beratungsunternehmen mit aktuellen und praxisrelevanten Ergebnissen aus der wissenschaftlichen Forschung.



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 als unmittelbare praxisrelevante Forschungsbedarfe aufgegriffen. So stellt das „Unternehmergegespräch Energie“ auch ein gelungenes Beispiel sowie eine gute Ausgangsbasis zur Weiterentwicklung von Transferformaten dar, wie es auch im Niedersächsischen Forschungs-





verbund „Transformation des Energiesystems Niedersachsen (TEN.efzn)“ vorgesehen ist.

Im Berichtszeitraum 2024 und 2025 haben die Kooperationspartner insgesamt wieder acht Veranstaltungen organisiert und durchgeführt. Das Portfolio der Themen umfasste dabei u.a. die Diskussion der neuen EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen, die energetische Sanierung von Nicht-Wohngebäuden, Konzepte für eine klimafreundliche Wärmeversorgung oder auch neue Qualifizierungsangebote für die Energiewende und die Ressourceneffizienz in der Produktion.







SCHLAGLICHTER

5.



Wasserstoff-Forum Süd-niedersachsen

21.03.2024

Die Gemeinschaftsveranstaltung von TU Clausthal, Wasserstoff-Allianz Süd-niedersachsen und H2 Goslar fand am 16. April im Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum statt.



Zukunftstag 2024 auf dem EnergieCampus Goslar

08.05.2024

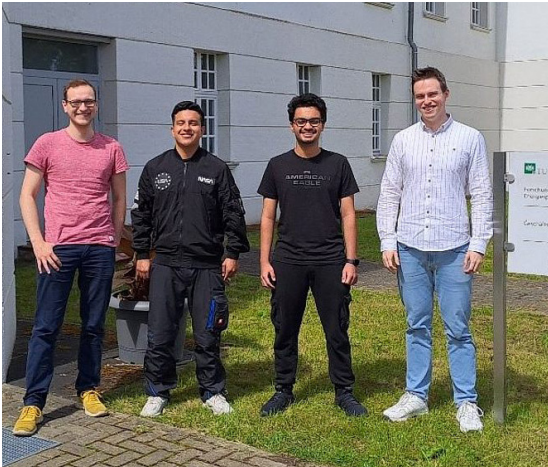
Insgesamt 30 Mädchen und Jungen aus der Region waren beim Zukunftstag am 25.04.2024 zu Gast auf dem EnergieCampus Goslar.



Transfernale 2024 auf dem EnergieCampus Goslar

14.06.2024

Unter dem Motto "Batterie? Na sicher! - Innovationen in der Batteriesicherheit" hat die Transfernale 2024 Station auf dem EnergieCampus Goslar gemacht.



Zwei US-Studenten beginnen Forschungs- praktika in Goslar

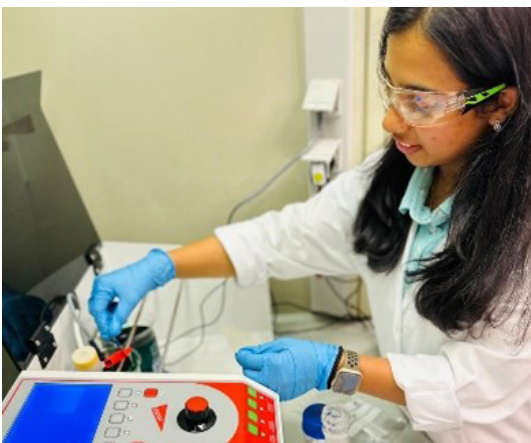
19.06.2024

Der Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) vermittelt Forschungspraktika für zwei US-amerikanische Bachelorstudenten am Forschungszentrum Energiespeichertechnologien.

Schüler:innen experi- mentieren im EST

20.09.2024

Bereits zum zweiten Mal hat das Fachseminar Energie im 12. Jahrgang des Werner-von-Siemens-Gymnasiums Bad Harzburg das EST in Goslar besucht.



Indische Studentin forscht am EST

23.10.2024

Das Indo-German Centre for Sustainability (IGCS) vermittelt Stipendien an Studierende und Forschende, deren Projekte im Bereich der Nachhaltigkeit von einem Forschungsaustausch zwischen Indien und Deutschland profitieren.



Brandbekämpfung optimieren

03.02.2025

Das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) der TU Clausthal und die Freiwillige Feuerwehr Goslar starten ein Forschungsprojekt zur Feuer- und Gefahrenabwehr bei Lithium-Ionen-Batterien.



Einblicke in die Clausthaler Energieforschung

25.06.2025

Studierende der Hochschule Harz informieren sich auf dem EnergieCampus Goslar.



Forscherinnen und Forschern aus aller Welt zu Gast im EST

18.09.2025

Im Rahmen der diesjährigen DAAD Green Hydrogen-Research Tour 2025 begrüßte das Forschungszentrum Energiespeichertechnologien (EST) der TU Clausthal mehr als 20 Forscherinnen und Forscher aus aller Welt, darunter Teilnehmende aus dem Europäischen Forschungsraum (ERA) und weiteren förderberechtigten Ländern.

Nachruf Andreas Bierwirth



Tief betroffen und traurig müssen wir Abschied von unserem ehemaligen Kollegen Andreas Bierwirth nehmen, der am 14.05.2025 nach langer schwerer Krankheit verstorben ist.

Von 2011–2021 war Andreas Bierwirth als Haustechniker zunächst am Energie-Forschungszentrum Niedersachsen und später am heutigen Forschungszentrum Energiespeichertechnologien der TU Clausthal beschäftigt. In den ersten Jahren hat er maßgeblich den Aufbau unserer Forschungseinrichtung unterstützt und durch seine vielfältigen Fertigkeiten und Ideen unseren Arbeitsalltag in vielerlei Hinsicht erleichtert. Mit seinem stets freundlichen und zuge-

wandten Wesen war er ein äußerst geschätzter Kollege und darüber hinaus „die gute Seele“ des EnergieCampus Goslar, die bereits seit seinem vorzeitigen Ausscheiden aus dem Dienst der TU Clausthal sehr vermisst wurde.

Nun müssen wir uns von Andreas Bierwirth verabschieden und danken ihm für die gemeinsame und erfolgreiche Zeit. Unser Mitgefühl gilt allen Hinterbliebenen. Wir werden Andreas Bierwirth in liebevoller Erinnerung behalten.

Im Namen der Beschäftigten des Forschungszentrums Energiespeichertechnologien und der Geschäftsstelle des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen,

Dr. Jens-Peter Springmann und Dr. Wolfgang Dietze



ANHANG

6.

EST-Publikationen 2024

Bericht

Jens Grabow, Nury Orazov, Ralf Benger und Sabine Weineck: Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase; Teilvorhabenbezeichnung: Risikoanalyse von Lithium-Ionen-Batterien : Schlussbericht für das Verbundprojekt RiskBatt : Laufzeit des Vorhabens: 04/2020 bis 09/2023, Berichtszeitraum: 01.04.2020 bis 30.09.2023. , Schlussbericht, Goslar, 2024, Nummer des Berichts: 01201762, 03ei3010a, DOI: 10.2314/KXP:1913944476.

Sancia Morris: Systematic study of porous electrodes and the development of highly catalytic galvanic coatings for alkaline water electrolysis, 2024, DAAD-BMBF funded research exchange program.

Buchteil

Janis Gerhardt-Mörsdorf, Christine Minke: Ökologische Bewertung von Wasserstoffherzeugungstechnologien, In: *H2-Wegweiser Niedersachsen : Energiesystemanalyse zur technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Integration, Speicherung und Konversion von Wasserstoff in Niedersachsen / Andreas Lindermeir (Hrsg.)*, Cuvillier, 2024. -ISBN 978-3-68952-945-1. – S. 35-45, (Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd. 83).

Janis Gerhardt-Mörsdorf, Christine Minke: Ökobilanzielle Randbedingungen für die Wasserstoff-Konversion, In: *H2-Wegweiser Niedersachsen : Energiesystemanalyse zur technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Integration, Speicherung und Konversion von Wasserstoff in Niedersachsen / Andreas Lindermeir (Hrsg.)*, Cuvillier, 2024. -ISBN 978-3-68952-945-1. – S. 141-142, (Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd. 83).

Christine Minke: Techno-Economics of Open Battery Systems, In: *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition: Cost, Sustainability, and Performance Analysis / Stefano Passerini, Linda Barelli, Manuel Baumann, Jens Peters, und Marcel Weil (Hrsg.)*, Springer International Publishing, 2024. – ISBN 978-3-031-48359-2. – S. 267-278, https://doi.org/10.1007/978-3-031-48359-2_15.

Buch

Andreas Lindermeir (Hrsg.): H2-Wegweiser Niedersachsen : Energiesystemanalyse zur technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Integration, Speicherung und Konversion von Wasserstoff in Niedersachsen, Göttingen : Cuvillier, 2024, ISBN 978-3-68952-945-1, (Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen; Bd. 83).

Datensätze

Jacob Klink: Measurement Dataset of Thermal Fault Emulation of a 46Ah High-Power Kokam Nano Pouch Cell via Uniform and Local Heating, Zenodo, 10. Oktober 2024, DOI: 10.5281/zenodo.13903526.

Jacob Klink, Nury Orazov, Jens Grabow, und Ralf Benger: Cell Characteristics for 46Ah High Power Kokam Nano Pouch Cell, Mendeley Data, 9. Oktober 2024, DOI: 10.17632/g443f7cn7p.2.

Mohammad Ayayda: Modeling Thermal Runaway Mechanisms and Pressure Dynamics in Prismatic Lithium-Ion Batteries, Zenodo, Dezember 2024, DOI: 10.5281/ZENODO.13981390.

Dissertation

Nury Orazov: Methode zur Zustandsbewertung thermisch beschädigter Lithium-Ionen-Zellen, TU Clausthal, 2024, DOI: 10.21268/20240429-0.

Abschlussarbeiten

Obada Alsawaf: Konzept zur Aufnahme der relevanten Größen in der Gasströmung einer Lithium-Ionen-Batterie beim Thermal Runaway, Masterarbeit, TU Clausthal, 2024.

Mohammad Ayayda: Modellierung der Innendruckentwicklung einer Lithium-Ionen-Batterie beim Thermal Runaway mit Venting-Prozess, Masterarbeit, TU Clausthal, 2024.

Farhang Ebrahimnezhad: Auslegung der Komponenten einer CO₂-armen Energieversorgung am EST mit ‚grünem‘ Wasserstoff und Ökostrom, Masterarbeit, TU Clausthal, 2024.

Maximilian Gasser: Untersuchung von Methoden zur Vorbehandlung und Konditionierung von sauerstoffbildenden Elektroden für die alkalische Wasserelektrolyse , Masterarbeit, TU Clausthal, 2024.

Amro Ghaith: Effiziente Integration von Energiespeichersystemen mit DC-DC-Wandlern in Sicherheitsstromversorgungen: Analyse und Vergleich verschiedener Varianten mit Kondensatoren und Akkumulatoren, Masterarbeit, TU Clausthal, 2024.

Jonatan Möller: Experimentelle Untersuchung der Stromdichte in Abhängigkeit des Gasphasenanteils für den upscaling Prozess einer AEL, Masterarbeit, TU Clausthal, 2024

Timo Reichrath: Simulationsbasierter Entwicklungs- und Validierungsprozess von Abschaltkonzepten in Batteriesystemen bei externem Kurzschluss, Masterarbeit, TU Clausthal, 2024.

Ahmad Ajam: Thermische Charakterisierung einer Lithium-Ionen-Pouchzelle durch Thermische Impedanzspektroskopie, Bachelorarbeit, TU Clausthal, 2024.

Gege Chen: Integrierte faseroptische Sensorik zur Messung und Modellierung der Volumenausdehnung von Anodenpartikeln in Lithium-Ionen Pouch Zellen, Bachelorarbeit, TU Clausthal, 2024.

Yunu Lee: Entwicklung eines stochastischen Reinigungsmodells für eine Spinat-Anschmutzung einschließlich Validierung mit vorhandenen Quellungs- und Bindungskraft-Versuchen, Bachelorarbeit, TU Clausthal, 2024.

Konferenz-Paper

Farhang Ebrahimnezhad, Ralf Benger, und Ines Hauer: Design approach for a low carbon energy supply in buildings by combining green hydrogen with thermal and electrical components, Power and Energy Student Summit, Dresden, 21.–23.10.2024, *PESS 2024*, Berlin: VDE, 2024. ISBN 978-3-8007-6473-0. S. 125–130.

Konferenz-Poster

André Hebenbrock, Nury Orazov, Ralf Benger, Wolfgang Schade, Ines Hauer, und Thomas Turek: Revolutionizing Monitoring: Hacking Prismatic Cells via External Fiber Bragg Grating Sensors, 16. Batterietagung 2024, Münster, Germany. 9.–11.04.2024.

Jacob Klink, Ralf Benger, Ines Hauer, Martin Eckert, Franziska Jach, Ulrike Wunderwald: Characterisation of the Aluminium-Graphite Battery for Comparison with Established Cell Technologies, 16. Batterietagung 2024, Münster, Germany. 9.–11.04.2024, DOI: 10.13140/RG.2.2.11888.26886.

Ulrike Wunderwald, Martin Eckert, Jacob Klink, u.a.: Pouch Cell Design for Aluminum-Graphite Batteries, 16. Batterietagung 2024,

Münster, Germany. 9.–11.04.2024.

Felix Gäde, Jonatan Möller, Maik Becker, und Thomas Turek: Influence of the gas void fraction on the efficiency of a real industrial alkaline water electrolysis cell, *Electrochemistry 2024*, Braunschweig, 16. September 2024.

Aleksandra Gladkova, Maik Becker, und Thomas Turek: Systematic Selection of Optimal Mesh Electrode Structures for Microfluidic Alkaline Water Electrolysis, *Electrochemistry 2024*, Braunschweig, 16. September 2024.

Oliver Zielinski, Maximilian Gasser, Maik Becker, und Thomas Turek: Investigation of Cleansing and Pretreatment Processes for Non-Precious Metal Electrodes Used in Water Electrolysis, *Electrochemistry 2024*, Braunschweig, 16. September 2024.

Janis Gerhardt-Mörsdorf: Life cycle assessment of a 5 MW PEM water electrolysis plant, 2nd SESBC Conference, Lund, Sweden. 24. Oktober 2024.

Vortrag

Ralf Benger: Brandvermeidungsstrategien für Lithium-Ionen-Batterien auf Zell- und Modulebene, Am: 25. Januar 2024, Anlässlich: 17. Fachkonferenz Lithiumbatterien, In: Göttingen.

Hartmut Weyer: Aufbau der Wasserstoffnetze, Am: 14. März 2024, Anlässlich: 3. Energierechtstag in NRW, In: Düsseldorf.

Jacob Klink: Detection of cell faults, Am: 9. April 2024, Anlässlich: Seminar: Thermal runaway and thermal propagation of lithium ion batteries, In: Haus der Technik (HDT), Online.

Christine Minke: Nachhaltige Verfahrenstechnik: Ressourcenknappheit und Klimawandel als Innovationstreiber, Am: 17. April 2024, Anlässlich: Akademie-Vorlesungen 2024 im Schloss: Transformation – Die Gesellschaft im Wandel, In: Braunschweig.

Simon Appelhaus: A novel dimensionless approach for leakage current modelling in alkaline water electrolysis stack systems, 7. Mai 2024, Anlässlich: Annual Meeting on Reaction Engineering and Electrochemical Processes : REACT 2024, In: Würzburg.

Jan Witte: Efficient Alkaline Membrane Water Electrolysis on Amorphous NiFe₂O₄ as OER Catalyst, 07. Mai 2024, Anlässlich: Annual Meeting on Reaction Engineering and Electrochemical Processes : REACT 2024, In: Würzburg.

Jan Witte: A Spray-Drying Approach for Highly Active Amorphous NiFe₂O₄ for AEM Water Electrolysis, 29. Mai 2024, Anlässlich: 245th ECS Meeting, In: San Francisco, CA.

Ralf Benger: Batterie? Na sicher! : Innovationen in der Batteriesicherheit, Am: 12. Juni 2024, Anlässlich: Transferale 2024, In: Goslar.

- Christine Minke: The relevance of flow batteries in sustainable energy storage, Am: 24 June 2024, Anlässlich: Workshop Energy Sustainability Task Force, European Commission, In: Online.
- Simon Appelhaus: Round robin testing of alkaline water electrolysis: a path towards standardization, Am: 17. September 2024, Anlässlich: Electrochemistry 2024, In: Braunschweig.
- Ralf Benger: Status quo Batterieentwicklung und Forschung für sichere Batterien, Am: 18. September 2024, Anlässlich: Arbeitskreis Ladeinfrastruktur, In: Wolfsburg.
- Simon Appelhaus, Maik Becker, Henning Becker, und Thomas Turek: Modelling and optimization of shunt current management in industrial alkaline water electrolysis: grounding, forced potentials and combination of multiple stacks, Am: 06. Oktober 2024, Anlässlich: PRiME 2024, In: Honolulu, HI.
- Felix Gäde, Jonatan Möller, Thomas Turek, Maik Becker: Influence of gas void fraction on electrode performance in industrial alkaline water electrolysis, Am: 11. Oktober 2024, Anlässlich: PRiME 2024, In: Honolulu, HI.
- Janis Gerhardt-Mörsdorf: Will the environmental impacts of green hydrogen be a matter of choice? – A prospective life cycle assessment of a large-scale proton exchange membrane water electrolysis plant, 22. Oktober 2024, Anlässlich: SETAC Europe 26th LCA Symposium, In: Göteborg, Sweden.
- Christine Minke: Keynote: Sustainability assessment of emerging energy technologies based on engineering science, 24. Oktober 2024, Anlässlich: 2nd SESBC conference, In: Lund, Sweden.
- Timo Reichrath: VentBatt-Projekt – Ventilgesteuertes Gasmanagement, Am: 7. November 2024, Anlässlich: Battery Experts Forum, In: Darmstadt.
- be, und Diethelm Johannsmann: An Electrochemical Quartz Crystal Microbalance (EQCM) Based on Microelectrode Arrays Allows to Distinguish between Adsorption and Electrodeposition, *The Analyst*, Bd. 149, Nr. 7 (2024): S. 2138–2146, <https://doi.org/10.1039/D3AN02210B>.
- Nick Blume, Oliver Zielinski, Maik Becker, und Christine Minke: Prospective Life Cycle Assessment of Chemical Electrolyte Recycling for Vanadium Flow Batteries: A Comprehensive Study, *Energy Technology*, Bd. 12, Nr. 1 (2024): Artikelnummer 2300750, <https://doi.org/10.1002/ente.202300750>.
- Marina Bockelmann, Maik Becker, Sebastian Stypka, Stina Bauer, Christine Minke und Thomas Turek: Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse: Grüner Wasserstoff, *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 58, Nr. 1 (2024): S. 29–45, <https://doi.org/10.1002/ciuz.202300024>.
- Jonathan Brandt, Thore Iversen, Christoph Eckert, u.a.: Cost and Competitiveness of Green Hydrogen and the Effects of the European Union Regulatory Framework, *Nature Energy*, Bd. 9, Nr. 6 (2024): S. 703–713, <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01511-z>.
- Yajing Chen, Urs Liebau, Shreyas Mysore Guruprasad, Iaroslav Trofimenko und Christine Minke: Advancing Life Cycle Assessment of Sustainable Green Hydrogen Production Using Domain-Specific Fine-Tuning by Large Language Models Augmentation, *Machine Learning and Knowledge Extraction*, Bd. 6, Nr. 4 (2024): S. 2494–2514, <https://doi.org/10.3390/make6040122>.
- Sascha Genthe, Marina Bockelmann, Christine Minke und Thomas Turek: Feasibility Study of a Novel Secondary Zinc-Flow Battery as Stationary Energy Storage System: From Design to Environmental Assessment, *Energy Technology*, Bd. 12, Nr. 6 (2024): Artikelnummer 2301639, <https://doi.org/10.1002/ente.202301639>.
- Sascha Genthe, Luis F. Arenas, Maik Becker, Ulrich Kunz und Thomas Turek: In Situ Determination of the Potential Distribution within a Copper Foam Electrode in a Zinc-Air/Silver Hybrid Flow Battery, *ChemElectroChem*, Bd. 11, Nr. 11 (2024): Artikelnummer e202400062, <https://doi.org/10.1002/celc.202400062>.
- Janis Gerhardt-Mörsdorf, Jimena Incer-Valverde, Tatiana Morosuk und Christine Minke: Exergetic life cycle assessment for green hydrogen production, *Energy*, Bd. 299 (Juli 2024): Artikelnummer 131553, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131553>.
- Janis Gerhardt-Mörsdorf, Florian Peterssen, Paula Burfeind, u.a.: Life Cycle Assessment of a 5 MW Polymer Exchange Membrane

Aufsätze in referierten Fachzeitschriften

- Simon Appelhaus, Lukas Ritz, Sharon-Virginia Pape, u.a.: Benchmarking Performance: A Round-Robin Testing for Liquid Alkaline Electrolysis, *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 95 (Dezember 2024): S. 1004–1010, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.288>.
- Mohammad Ayayda, Ralf Benger, Timo Reichrath, Kshitij Kasturia, Jacob Klink, und Ines Hauer: Modeling Thermal Runaway Mechanisms and Pressure Dynamics in Prismatic Lithium-Ion Batteries, *Batteries*, Bd. 10, Nr. 12 (2024): Artikelnummer 435, <https://doi.org/10.3390/batteries10120435>.
- Michael Biermann, Christian Leppin, Arne Langhoff, Thorben Ziemer, Christian Rem-

- Water Electrolysis Plant, *Advanced Energy and Sustainability Research*, Bd. 5, Nr. 4 (2024): Artikelnummer 2300135, <https://doi.org/10.1002/aesr.202300135>.
- André Hebenbrock, Nury Orazov, Ralf Bengler, Wolfgang Schade, Ines Hauer und Thomas Turek: Innovative Early Detection of High-Temperature Abuse of Prismatic Cells and Post-Abuse Degradation Analysis Using Pressure and External Fiber Bragg Grating Sensors, *Batteries*, Bd. 10, Nr. 3 (2024): Artikelnummer 92, <https://doi.org/10.3390/batteries10030092>.
- Sean Ray Kahnert, Jan C. Namyslo, Kari Rissanen, Martin Nieger und Andreas Schmidt: Imidazolium Dicyanomethylides as N-Ylide Precursors of Anionic N-Heterocyclic Carbenes, *European Journal of Organic Chemistry*, Bd. 27, Nr. 23 (2024): Artikelnummer, e202400163, <https://doi.org/10.1002/ejoc.202400163>.
- Torben Lemmermann, Maik Becker, Maria Stehle, u.a.: Monitoring of Vanadium Mass Transfer Using Redox Potential Probes inside Membranes during Charge and Discharge of Flow Batteries: An Experimental Study, *Journal of Power Sources*, Bd. 596 (März 2024): Artikelnummer 233983, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233983>.
- Alexander M. Leshansky, Boris Y. Rubinstein, Itzhak Fouxon, Diethelm Johannsmann, Marta Sadowska und Zbigniew Adamczyk: Quartz Crystal Microbalance Frequency Response to Discrete Adsorbates in Liquids, *Analytical Chemistry*, d. 96, Nr. 26 (2024): S. 10559–10568, <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c00968>.
- Levin Matz, Boris Bensmann, Richard Hanke-Rauschenbach und Christine Minke: Resource-Efficient Gigawatt Water Electrolysis in Germany—A Circular Economy Potential Analysis, *Circular Economy and Sustainability*, Bd. 4, Nr. 2 (2024): S. 1153–1182, <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00345-x>.
- Sven Nagorny, Marvin Schewe, Thea Wein-gartz, u.a.: Stabilities of Bis(Thienyl)Ethenes in Polymethyl Methacrylate (PMMA) Coatings as Absorbance Modulation Layers for Nanoscale Imaging, *Materials Advances*, Bd. 5, Nr. 1 (2024): S. 159–170, <https://doi.org/10.1039/D3MA00791J>.
- Lucas Pruschinski, Jan C. Namyslo und Andreas Schmidt: Anionic N-Heterocyclic Carbenes from Mesoionic Imidazolium-4-Pyrrolides: The Influence of Substituents, Solvents, and Charge on Their⁷⁷Se NMR Chemical Shifts, *The Journal of Organic Chemistry*, Bd. 89, Nr. 20 (2024): S. 15003–10519, <https://doi.org/10.1021/acs.joc.4c01732>.
- Sahar Rabet, Willi Tobaschus, Gaseng Chung, u.a.: Exploring Impurity Effects and Catalyst Surface Features in Furfural Electroreduction for Jet Fuel Precursor Production: Experimental and Molecular Dynamics Insights, *ChemElectroChem*, Bd. 11, Nr. 15 (2024): Artikelnummer e202400336, <https://doi.org/10.1002/celec.202400336>.
- Lavrans F. Söffker, Thomas Turek, Ulrich Kunz und Luis F. Arenas: Screening of Cation Exchange Membranes for an Anthraquinone-ferrocyanide Flow Battery, *ChemElectroChem*, Bd. 11, Nr. 22 (2024): Artikelnummer e202400516, <https://doi.org/10.1002/celec.202400516>.
- Frédéric Steiner, Ali Zgheib, Maximilian Hans Fischer, Lukas Büttner, Andreas Schmidt und Sandra Breitung-Faes: In Situ Hydrophobization of Lithium Aluminate Particles for Flotations by Dry Grinding in the Presence of Punicines, *Minerals*, Bd. 14, Nr. 7 (2024): Artikelnummer 650, <https://doi.org/10.3390/min14070650>.
- Alexander Tombrink, Sven Nagorny, Sviatoslav Batsyts, u.a.: Highly Sensitive Switchable Sensors for Hydroxide on Glass Surfaces Based on Isoquinolinium-Quinolinium-substituted Acetylenes, *Chemistry – A European Journal*, Bd. 30, Nr. 22 (2024): Artikelnummer e202304034, <https://doi.org/10.1002/chem.202304034>.
- Hartmut Weyer, Alexandra Scheunert und Jan Schlüpmann: Das neue Ausschließlichkeitsprinzip der Stromspeicherung (Teil 1), *Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft*, Nr. 11 (2024): S. 408–413.
- Hartmut Weyer, Alexandra Scheunert und Jan Schlüpmann: Das neue Ausschließlichkeitsprinzip der Stromspeicherung (Teil 2), *Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft*, Nr. 12 (2024): S. 447–450.
- Ali Zgheib, Sophie Acker, Maximilian Hans Fischer, u.a.: Lithium Aluminate Flotation by pH- and Light-Switchable Collectors Based on the Natural Product Punicine, *RSC Advances*, Bd. 14, Nr. 13 (2024): S. 9353–9364, <https://doi.org/10.1039/D4RA00116H>.
- Ali Zgheib, Maximilian H. Fischer, Jan C. Namyslo, u.a.: Photo-switchable Collectors for the Flotation of Lithium Aluminate for the Recycling of the Critical Raw Material Lithium, *ChemSusChem*, Mai 2024, Artikelnummer e202301900, <https://doi.org/10.1002/cssc.202301900>.
- Ali Zgheib, Maximilian Hans Fischer, Stéphanie Mireille Tsanang, u.a.: The Effect of Plasma Pretreatment on the Flotation of Lithium Aluminate and Gehlenite Using Light-Switchable Collectors, *Separations*, Bd. 11, Nr. 12 (2024): Artikelnummer 362, <https://doi.org/10.3390/separations11120362>.

EST-Publikationen 2025

Bericht

- Ralf Benger, Jens Grabow, Nury Orazov und Sabine Weineck: Risikobewertung von Lithium-Ionen-Batterien (RiskBatt): Kurzfassung der Ergebnisse des Fördervorhabens „RiskBatt“ – Risikoanalyse für lithiumionenbasierte Energiespeichersysteme im sicherheitskritischen Havariefall unter besonderer Berücksichtigung der dabei freigesetzten toxischen und explosiven Schadgase (Förderkennzeichen 03EI3010A), Report, Goslar, 2025, <https://doi.org/10.21268/20250207-0>.
- Sophie Boas: Ökobilanzierung eines kompakten Wasserstoffkompressors, Studienarbeit, TU Clausthal, 2025.
- Jaydeep Vavdiya: Morphological effect of electrode weave on water electrolysis performance, 2025, DAAD-BMBF funded research exchange program.

Buchteil

- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Capacitance, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 473-478, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00121-3>
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Capacity, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 465-472, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00056-6>.
- Heinz Wenzl, Ralf Benger, und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Efficiency, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 498-506, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00085-2>
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Energy, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 479-486, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00068-2>
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Lifetime, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-

0-323-95822-6. S. 517-525, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00101-8>

- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Power, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 487-497, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00082-7>.
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Safety and State-of-Safety (SoS), In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 559-564, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00120-1>.
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | Self-Discharge, In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 507-516, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00093-1>
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | State-of-Charge (SoC), In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 526-533, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00094-3>.
- Heinz Wenzl, Ralf Benger und Ines Hauer: Electrochemical Terminology | State-of-Health (SoH), In: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources (Second Edition)*, Bd. 1 / Jürgen Garche (Hrsg.), Elsevier, 2025. ISBN 978-0-323-95822-6. S. 553-558, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96022-9.00107-9>.

Datensätze

- Lukas Gottheil und Jens Bremer: Shifting towards dynamic and load-flexible ammonia synthesis via polytropic fixed-bed reactors - Modeling results, Zenodo, 27. November 2025, <https://doi.org/10.5281/zenodo.17648949>.
- André Hebenbrock, Fangqi Li, Wolfgang Schade und Thomas Turek: Referenceless Surface FBC Sensors on Pouch cells - raw data: Calibration data, constant current validation, WLTP validation, thermal abuse, Zenodo, Dec 16, 2024–May 26, 2025, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15388590>.

Jacob Klink, Jens Grabow, Nury Orazov, und Ralf Bengler: Internal Short Circuits of Lithium-ion Cells by Needle Penetration, Zenodo, 21. Oktober 2025, <https://doi.org/10.5281/zenodo.15852707>.

Abschlussarbeiten

Nils Höges: Elektrochemische Modellierung mit Hilfe eines Pseudo-2-Dimensionalen-Modells mit PyBaMM am Beispiel einer Natrium-Ionen-Batterie, Masterarbeit, TU Clausthal, 2025.

Steven Naruhn: Life Cycle Assessment einer Wasserstoff-Verflüssigungsanlage, Masterarbeit, TU Clausthal, 2025.

Zimu Wang: Software-Assisted Lifetime Analysis of NMC Lithium-Ion Batteries through Event-Based Damage Accumulation and Data Processing, Masterarbeit, TU Clausthal, 2025.

Xinming Chen: Experimental investigation of the influence of bubbles on the conductivity of liquid electrolyte streams in tubes for alkaline water electrolysis systems, Bachelorarbeit, TU Clausthal, 2025.

Zhewen Jin: Development of Tailored Catalyst Support Particles Using an innovative 3D Printing Process, Bachelorarbeit, TU Clausthal, 2025.

Konferenz-Paper

S. Zhang, A. Wollmann, A. Weber, und T. Gimpel: Desoxidation von Metallpulvern in einem mit einer Wirbelschicht kombinierten DBD-Plasmareaktor unter H₂-Atmosphäre, 6. Symposium Materialtechnik, Clausthal-Zellerfeld, 20. bis 21. Februar 2025, Tagungsband 6. Symposium Materialtechnik / Clausthaler Zentrum für Materialtechnik (Hrsg.), Clausthal-Zellerfeld, 2025, <https://doi.org/10.21268/20250507-13>.

Konferenz-Poster

Mohammad Ayayda: Methodology for Estimating Outgassing Products of Lithium-Ion-Batteries during Thermal Runaway to Evaluate Possible Early Reversible Electrolyte Expulsion, Advanced Battery Power 2025, Aachen, 02.-03. April 2025.

Mohammad Ayayda: Modeling and Simulation of Thermal Runaway and Pressure Evolution in Prismatic Lithium-Ion Batteries, Advanced Battery Power 2025, Aachen, 02.-03. April 2025.

Jacob Klink, Jacob, Ralf Bengler und Ines Hauer: Systematic Comparison of Signal-Based In-

ternal Short Circuit Detection Methods for Lithium-Ion Batteries, Advanced Battery Power 2025, Aachen, 02.-03. April 2025, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25690.86721>.

Lukas Gottheil und Jens Bremer: Rethinking Ammonia Synthesis – Shifting Towards Load-Flexible Operation via Polytropic Fixed-Bed Reactors, Annual Meeting on Reaction Engineering 2025, Würzburg, 26.-28. Mai 2025.

Felix Gäde, Maik Becker und Thomas Turek: Influence of different cell spacer configurations on gas void fractions related to industrial alkaline water electrolysis cells, 5. International Conference on Electrolysis (ICE), Freiburg, 25. August 2025.

Vortrag

Henning Becker, Marina Becker und Maik Becker: A network model-based analysis of stray currents in electrochemical stacks and development of design strategies for optimized stack layouts, 11. März 2025, Anlässlich: 21st Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (ModVal 2025), In: Karlsruhe, Germany, <https://doi.org/10.48584/opus-10318>.

Jan Witte: Unveiling the Impact of CCS Properties on Hydrogen Crossover and Cell Performance in AEM Water Electrolysis, 21. Mai 2025, Anlässlich: 247th ECS Meeting, In: Montréal, Canada.

Simon Appelhaus, Xinming Chen, Becker und Thomas Turek: Influence and use of gas bubbles for the reduction of stray currents in industrial alkaline water electrolysis, 4. Juli 2025, Anlässlich: EFCF 2025, In: Luzern, Schweiz.

Ralf Bengler: Zustandserkennung kritischer Lithium-Ionen-Batterien und Vermeidung des Thermal Runaways, 16. Juli 2025, Anlässlich: DGUV Fachgespräch „Lithium-Ionen-Akkus & eMobility“, In: Dresden.

Jan Witte: Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis on Amorphous Spray-Pyrolyzed NiFe₂O₄, 25. August 2025, Anlässlich: 5th International Conference on Electrolysis, In: Freiburg.

Aleksandra Gladkova: Optimizing mesh electrode structure for a novel microfluidic water electrolysis cell, 26. August 2025, Anlässlich: 5th International Conference on Electrolysis, In: Freiburg.

Christine Minke: Keynote: Electromobility and the circular economy: addressing challenges through sustainable concepts and recycling, 27. August 2025, Anlässlich: Roads to the Future, In: Göteborg, Sweden

Simon Appelhaus: Investigation of stray cur-

rent induced local degradation in alkaline water electrolysis cells, 28. August 2025, Anlässlich: 5th International Conference on Electrolysis, In: Freiburg.

Janis Gerhardt-Mörsdorf: An approach for the design and environmental assessment of absolute regenerative circular Power-to-X systems, 30. September 2025, Anlässlich: First International Conference on Absolute Sustainability, In: Helsingor, Denmark.

Lukas Gottheil und Jens Bremer: Beyond the Limits of Conventional Ammonia Synthesis: Enhancing Single-Pass Conversion and Unlocking Load-Flexible Operation via Polytropic Fixed-Bed Reactors, 5. November 2025, Anlässlich: 2025 AIChE Annual Meeting, In: Boston, USA.

Lukas Gottheil und Jens Bremer: Redefining Ammonia Synthesis Reactors – Optimal Reactor Design Considering Options for Electrical Energy Integration, 5. November 2025, Anlässlich: 2025 AIChE Annual Meeting, In: Boston, USA.

Christine Minke: Sustainability assessment of emerging energy technologies, 25. November 2025, Anlässlich: GDCh-Kolloquium, In: Aachen.

Aufsätze in referierten Fachzeitschriften

Stina Bauer, Jan C. Namyslo, Thomas Turek und Dieter E. Kaufmann: Synthesis, Characterization and Application of Thioindigo-sulfonic Acids as Electrolytes in an Aqueous Organic Redox Flow Battery, *ChemElectroChem*, Bd. 12, Nr. 6 (2025), Artikelnummer e202400623, <https://doi.org/10.1002/celc.202400623>.

Carlo Caianiello, Tim Tichter, Luis F. Arenas und René Wilhelm: Toward Symmetric Organic Aqueous Flow Batteries: Triarylamine-Based Bipolar Molecules and Their Characterization via an Extended Koutecký–Levich Analysis, *Chemistry – A European Journal*, Bd. 31, Nr. 31 (2025): Artikelnummer e202500815, <https://doi.org/10.1002/chem.202500815>.

Yajing Chen, Mohamed Benchat und Christine Minke: Working with Uncertainty in Life Cycle Costing: New Approach Applied to the Case Study on Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, *Frontiers in Energy*, Bd. 19, Nr. 6 (2025): S. 1109–1128, <https://doi.org/10.1007/s11708-025-1033-1>.

Yuxiao Ding, Thomas Gimpel, Alexander Klyushin, u.a.: Surficial Functionalization of Monolithic Carbon Electrode via Femtosecond Laser Treatment, *ChemElectroChem*, Bd. 12, Nr. 19 (2025), Artikelnummer e202500189, <https://doi.org/10.1002/celc.202500189>.

Martin Eckert, Ngoc-Tram Nguyen, Max Bam-

berg, u.a.: On the challenge of developing scalable and sustainable aluminum-ion batteries: from active to passive materials, *ECS Meeting Abstracts*, Bd. MA2025-01, Nr. 1 (2025), S. 50, <https://doi.org/10.1149/MA2025-01150mtgabs>.

Lukas Gottheil und Jens Bremer: Shifting towards dynamic and load-flexible ammonia synthesis via polytropic fixed-bed reactors *Chemical Engineering Journal*, Bd. 526 (2025), Artikelnummer 170927, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170927>.

André Hebenbrock, Fangqi Li, Wolfgang Schade und Thomas Turek: Referenceless Surface FBG Sensors: Combined Thermal and Mechanical Monitoring of Pouch Cells, *Electrochimica Acta*, Bd. 539 (November 2025): Artikelnummer 146975, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146975>.

Annika C. Hoppe und Christine Minke: Reducing Environmental Impacts of Water Electrolysis Systems by Reuse and Recycling: Life Cycle Assessment of a 5 MW Alkaline Water Electrolysis Plant, *Energies*, Bd. 18, Nr. 4 (2025): Artikelnummer 796, <https://doi.org/10.3390/en18040796>.

Jacob Klink, Sebastian Helm, Wenwen Yang, u.a.: Instantaneous Reserve by Battery Energy Storage Systems – a Holistic System Model to Analyze the Dynamic Power System Interactions, *Energy Reports*, Bd. 13 (Juni 2025), S. 3096–3111, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.02.035>.

Lukas Lentz, Dorian Hüne, Sebastian Handrich, Christoph Niems und Thomas Gimpel: Bubble Evolution Detector B.E.D. - a Neural Network-Based Approach to Accurately Detect, Classify, and Evaluate Gas Bubbles Captured by a High-Speed Camera on Textured Surfaces, *Journal of Open Research Software*, Bd. 13, Nr. 1 (2025), Artikelnummer 5, <https://doi.org/10.5334/jors.505>.

Yurii V. Ostapiuk, Oksana V. Barabash, Mary Y. Ostapiuk, Colin Herzberger, Mattes Plieth und Andreas Schmidt: Three-Component Syntheses of Functionalized Selenocyanates, *Synthesis*, Bd. 57, Nr. 03 (2025), S. 647–58, <https://doi.org/10.1055/s-0040-1720145>.

Jan Witte, Vinzent Olszok, Alfred P. Weber und Thomas Turek: Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis on Amorphous Spray-Pyrolyzed NiFe₂O₄, *ChemElectroChem*, Bd. 12, Nr. 16 (2025): Artikelnummer e202500226, <https://doi.org/10.1002/celc.202500226>.

Jan Witte, Philip Jordan und Thomas Turek: Experimental investigation of OER catalysts under real-life conditions in half-cell setup for Anion Exchange Membrane Water Electrolysis, *Electrochimica Acta*, Bd. 517 (März 2025): Artikelnummer 145539, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.145539>.

org/10.1016/j.electacta.2024.145539.

Jan Witte, Patrick Trinke, Boris Bensmann, Maik Becker, Richard Hanke-Rauschenbach und Thomas Turek:, Influence of Contact Pressure on Hydrogen Crossover and Polarization Behavior in AEM Water Electrolysis, *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 172, Nr. 1 (2025), Artikelnummer 014502, <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad9cce>.

Impressum

Herausgeber

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

Redaktion

Dr. Jens-Peter Springmann

Lektorat

wortschmiedin.de, Sandra Köhler

Layout und Satz

Melanie Exner

Bildnachweis

Christian Ernst: S. 85, 87
Silvia Steinbach: Titelbild, S. 4, 12, 35, 78
stock.adobe.com: S. 8 (Rezaul), 90 (Rymden), 96 (Nuran)

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

August 2026