

ZSW 2025

Jahresbericht
Annual Report



Copyright
 Das Urheberrecht steht dem Herausgeber zu.
 Veröffentlichungen und auszugsweise Verwendung sind
 ohne ausdrückliche Genehmigung des Herausgebers
 nicht zulässig. Zuwiderhandlung wird rechtlich verfolgt.

The copyright is held by the publisher.
 The publication of this document or any part thereof
 is strictly subject to the permission of the publisher.
 Any contraventions will result in legal action.

INHALT CONTENTS

- 04 **Vorwort**
Foreword
- 05 **Stiftung**
Foundation
- 06 **Leitbild**
Our Mission

10 ERFOLGE 2025 SUCCESS STORIES 2025



20 SCHWERPUNKTBERICHT FOCUS REPORT Zwischen Mikroskop und Megawatt: wie Materialanalytik die Energie- wende antreibt From microscopes to megawatts: How materials analysis is driving the energy transition

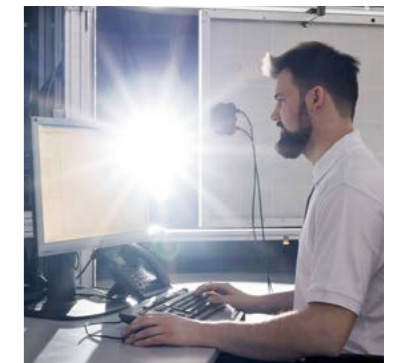


36 FACHGEBIETE & FORSCHUNGSPROJEKTE DEPARTMENTS & RESEARCH PROJECTS

- 38 **Systemanalyse**
Systems Analysis
- 42 **Photovoltaik: Materialforschung**
Photovoltaics: Materials Research
- 46 **Photovoltaik:**
Module Systeme Anwendungen
Photovoltaics:
Modules Systems Applications
- 50 **Akkumulatoren Materialforschung**
Accumulators Materials Research
- 54 **Produktionsforschung**
Production Research
- 58 **Akkumulatoren**
Accumulators
- 60 **Regenerative Energieträger und
Verfahren**
Renewable Fuels and Processes
- 64 **Brennstoffzellen Grundlagen**
Fuel Cell Fundamentals
- 68 **Brennstoffzellen Stacks**
Fuel Cell Stacks
- 72 **Brennstoffzellen Systeme**
Fuel Cell Systems

74 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT PUBLIC RELATIONS

- 76 **Impressionen 2025**
Impressions 2025
- 82 **Sichtbarkeit**
Visibility
- 83 **Mitgliedschaften**
Memberships



84 DOKUMENTATION DOCUMENTATION

- 86 **Finanzbericht**
Financial Report
- 87 **Personalentwicklung**
Staff Development
- 88 **Organisationsstruktur**
Organisational Structure
- 89 **Standorte**
Locations
- 90 **Bildnachweis**
Image Credits
- 90 **Impressum**
Imprint

VORWORT

Das Jahr 2025 war für das ZSW wie für viele vergleichbare Institute wirtschaftlich sehr anspruchsvoll. Der bis zum Herbst fehlende Bundeshaushalt eröffnete wenig Raum, um neue Forschungsvorhaben auf nationaler Ebene zu starten. Zudem erschwerte die schwierige Lage vieler Industrieunternehmen den Technologietransfer und die Akquisition von Aufträgen. Dennoch wurden durchaus beachtenswerte Erfolge erzielt, etwa seismologische Untersuchungen an unserem Forschungs-windtestfeld für das europäische Einstein-Teleskop. Weitere Highlights waren die Fertigstellung eines Teststandes für Multimegawatt-Elektrolyseure, die nachhaltige Prozessierung flexibler Perowskit-Solarzellen, PFAS-freie Membranen für PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseure sowie insbesondere die Inbetriebnahme des Powder-Up!-Kathodentechnikums, das Materialsynthesen für neuartige Batterien im industriennahen 100-kg-Maßstab ermöglicht. Materialien und deren Analytik als unsichtbare Treiber der Energiewende widmet sich auch der diesjährige Schwerpunktbericht »Zwischen Mikroskop und Megawatt«, der anhand unserer apparativen Ausstattung vielfältige Einblicke in kleinste Strukturen bietet, die Großes bewirken können.

Das Interesse an unseren Forschungsarbeiten ist groß. Dieser Erfolg ist vor allem das Verdienst aller Mitarbeitenden am ZSW, für deren großartigen Einsatz wir uns herzlich bedanken. Unser Dank geht auch an die Mitglieder des Kuratoriums sowie dessen Vorsitzenden Dr. Peter Lamp. Für die finanzielle Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit danken wir dem Land Baden-Württemberg sowie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft. Allen Leserinnen und Lesern des ZSW-Jahresberichts wünschen wir eine interessante Lektüre!



FOREWORD

The ZSW, like many comparable institutes, faced significant economic challenges in 2025. The federal government budget, which was delayed until autumn, offered little scope for initiating new research projects at the national level. Furthermore, the challenging situation facing many industrial companies weighed on technology transfer issues and the acquisition of orders. Despite these challenges, notable successes were achieved in 2025, not least the seismological investigations conducted at our wind test site to support the European Einstein Telescope project. Other highlights included completion of a test bench for multi-megawatt electrolyzers, the sustainable processing of flexible perovskite solar cells, and PFAS-free membranes for PEM fuel cells and PEM electrolyzers. The commissioning of the Powder-Up! cathode pilot plant was a particularly noteworthy event, as the site now facilitates materials synthesis for novel batteries at near-industrial 100 kg scale. As the invisible driver of the energy transition, materials and associated analyses are the subject of this year's focus report: »From Microscopes to Megawatts«. Drawing on our extensive equipment portfolio, the report provides wide-ranging insights into tiny structures with the potential to make a huge difference.

Our research is attracting keen interest. We owe our success, above all, to the work of all ZSW staff members, to whom we are extremely grateful for their outstanding commitment. We would also like to extend our gratitude to the members of our Board of Trustees and its Chair, Dr Peter Lamp. We would like to thank the State of Baden-Württemberg and our partners in business, public research promotion and academia for their financial support and excellent collaboration. We hope that you enjoy reading the ZSW Annual Report for 2025!

Der Vorstand des ZSW
(v.l.n.r.):
The ZSW Board of Directors
(from left):

Prof. Dr. Markus Hölzle,
Prof. Dr. Frithjof Staiß,
Prof. Dr. Michael Powalla.



Mitglieder des Kuratoriums:

Members of the Board of Trustees:



Die ZSW-Gebäude in Ulm (oben) und in Stuttgart (unten).



The ZSW buildings in Ulm (top) and Stuttgart (bottom).

STIFTUNG

Das ZSW wurde 1988 als gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts gegründet. Stiftungszweck ist: »Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien, Energieeffizienz, Energiewandlung und Energiespeicherung, insbesondere auf dem Gebiet der Sonnenenergie und Wasserstofftechnologie in Abstimmung mit der universitären und außeruniversitären Forschung sowie durch Umsetzung der erarbeiteten Ergebnisse in die industrielle Praxis zu betreiben und zu fördern.«

FOUNDATION

The ZSW was established in 1988 as a non-profit foundation constituted under the German Civil Code (BGB). The foundation's objective is: »to conduct and promote research and development in the field of renewable energy technologies, energy efficiency, energy conversion and storage, with a focus on solar energy and hydrogen technology, in cooperation with university and non-university research and by transferring the results into industrial application.«

LEITBILD

ENERGIE MIT ZUKUNFT

Ohne Energie kein Fortschritt, ohne Energie keine Prosperität. Energie ist Treiber für Innovationen und selbst Gegenstand von Innovationen. Das Leitbild der Klimaneutralität ist untrennbar mit der Nutzung erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energieeffizienz verbunden. Dafür arbeitet das ZSW: wir entwickeln klimafreundliche Technologien in den Bereichen Photovoltaik und Windenergie, Batterien für die Elektromobilität und stationäre Anwendungen sowie Wasserstoff – von der Erzeugung mittels Elektrolyse bis zur Anwendung in Brennstoffzellen oder der Weiterverarbeitung zu synthetischen Energieträgern. Darüber hinaus erstellen wir technische und ökonomische Konzepte für deren Integration in Energiesysteme. Im Rahmen des Know-how-Transfers an die Wirtschaft werden aus Prototypen und guten Konzepten Produkte. Gleichzeitig unterstützen wir die Politik und Gesellschaft mit Systemanalysen und Empfehlungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende.

WISSENSCHAFT MIT KLAREM FOKUS

In unseren Arbeitsgebieten zählen wir zu den international führenden Forschungseinrichtungen. Nur wer sich im Forschungswettbewerb behauptet, ist in der Lage, Schlüsseltechnologien erfolgreich zu entwickeln und mit der Wirtschaft umzusetzen. Dafür spielt die Vernetzung von Wissensdisziplinen aus Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften am ZSW eine große Rolle.

TECHNOLOGIETRANSFER SCHAFFT ARBEITSPLÄTZE

Als industrieorientiertes Forschungsinstitut ebnen wir neuen Technologien den Weg in den Markt. Von der Materialforschung über die Entwicklung von Prototypen und Produktionsverfahren bis hin zu Anwendungssystemen, Qualitätstests und Marktanalysen decken wir die gesamte Wertschöpfungskette ab. Diese Expertise aus einer Hand ist für unsere Partner aus der Wirtschaft ein wesentlicher Erfolgsfaktor.



OUR MISSION

ENERGY IS OUR FUTURE

Energy is crucial for progress and prosperity. It drives innovation and is itself the subject of innovation. The general principle of climate neutrality is inextricably linked to the use of renewable energy, increased energy efficiency and the idea of the circular economy. Our work at the ZSW revolves around the development of eco-friendly technologies in photovoltaics and wind energy, batteries for electric vehicles and stationary applications, and also hydrogen – from generation by means of electrolysis right through to its use in fuel cells or further processing into synthetic energy sources. We work on technical and economic concepts to support the integration of these technologies into energy systems. Prototypes and viable designs become products through a transfer of expertise to industry. We are also active in the political world and in the social arena, delivering analyses and recommendations for the successful implementation of the energy transition.

SCIENCE IS OUR POWER

We are among the leading research institutions in our fields, which allows us to compete at international level, successfully develop key technologies and implement them in partnership with business. Linking the disciplines of science, engineering and economics is central to our work at the ZSW.

INNOVATION IS OUR STRENGTH

As an industry-oriented research institute, we pave the way for new technologies to enter the market. We cover the entire value-added chain, from material science, prototype development and production processes right through to application systems, quality tests and market analyses. This breadth of expertise from a single source is a key success factor for our partners in the business world.



QUALITÄT FÜR UNSERE KUNDEN

Die Zufriedenheit unserer Kunden hat oberste Priorität. Als unabhängiges Institut reagieren wir schnell und flexibel. Die Qualität unserer Leistungen, Budget- und Termintreue sowie Vertraulichkeit stimmen. Dazu trägt auch unser zertifiziertes Qualitätsmanagement bei.

MOTIVIERT IM TEAM

Die Leistungsfähigkeit des ZSW basiert auf einer hohen fachlichen Qualifikation und Motivation aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die gelebte Wertschätzung des Einzelnen, der kollegiale Umgang miteinander und transparente Entscheidungsprozesse sind ein zentrales Element unseres Selbstverständnisses.

DEM GANZEN VERPFLICHTET

Vorstand, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ZSW fühlen sich dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Kriterien unserer Technologieentwicklung sind deshalb die Schonung natürlicher Ressourcen, gesellschaftlicher Konsens und wirtschaftliche Tragfähigkeit.

AKTEURE NEUTRAL INFORMIEREN

Unsere Themen sind komplex. Darum informieren wir Wirtschaft, Politik und Gesellschaft: nachvollziehbar und neutral. Denn nur wer eine neue Technologie versteht und bewerten kann, wird ihre Umsetzung in die Praxis unterstützen und so dazu beitragen, die Energieversorgung von morgen zu gestalten.

QUALITY IS OUR WATCHWORD

The satisfaction of our customers and partners is our top priority. As an independent institute, we can respond with speed and flexibility. We take pride in the quality of our services, our budget compliance, our adherence to deadlines and our commitment to confidentiality. Our high standards owe much to our certified quality management.

TEAMWORK IS OUR BOND

The strength of the ZSW is founded on the motivation of our highly qualified and professional employees. Active recognition of each individual, good relations among colleagues and transparent decision-making processes are all central to our identity.

ENVIRONMENTAL PROTECTION IS OUR CONCERN

At the ZSW, managers and employees alike are committed to the Sustainable Development Goals. The protection of natural resources, social consensus and economic viability are the criteria on which our technology is based.

KNOWLEDGE IS OUR FORCE

The subjects on our research agenda are complex. With this in mind, we deliver information to stakeholders in industry, politics and society in a transparent and neutral manner. Our goal is to facilitate understanding and evaluation of new technologies and, in doing so, win support for their practical application and help shape the energy supply of the future.

ERFOLGE 2025

SUCCESS STORIES

Innovationen für eine klimaneutrale Energieversorgung sind das Metier des ZSW – und die Grundlage für den Technologietransfer in die Industrie. Unsere Wege zu neuen Lösungen verlaufen dabei selten geradlinig: Bestehende Denkansätze werden konsequent hinterfragt, angepasst und durch bessere Konzepte ersetzt. Umso erfreulicher ist es, wenn diese Arbeit in erfolgreichen Anwendungen mündet und von Industriepartnern, Politik und Öffentlichkeit gewürdigt wird. Einige ausgewählte Beispiele aus den Forschungsfeldern des ZSW im Jahr 2025 stellen wir hier exemplarisch vor.

The ZSW is dedicated to developing innovations for climate-neutral energy supplies, paving the way for technology transfer into industry. However, our work to produce these innovations is rarely straightforward, as we systematically scrutinise and adapt existing approaches and replace them with better concepts. This makes it all the more satisfying when our work leads to successful applications and is recognised by industry partners, political stakeholders and the wider public. This section presents a selection of the research projects pursued by the ZSW in 2025.





Powder-Up!-Spezialausstattung: Hochtemperatur-Kalzination im RHK8-Ofen zur Verarbeitung von bis zu 5 kg Material pro Probe.

Powder-Up! features specialised equipment like this RHK8 furnace for high-temperature calcination of up to 5 kg of material per sample.

KATHODENTECHNIKUM POWDER-UP!: INBETRIEBNAHME UND ERSTE PROJEKTE

Seit Mitte 2025 betreibt das ZSW die Pilotanlage »Powder-Up!« – ein vom Bund und der Landesregierung Baden-Württemberg geförderter Leuchtturm für die Industrie und Wissenschaft zur Entwicklung nachhaltiger Energiespeichermaterialien. Am Standort Ulm entwickeln Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler innovative – kobaltarme und energiereiche – Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien und stellen sie in Chargen von bis zu 100 kg her. Solche Mengen werden benötigt, um große Batteriezellen zu bauen. Die Anlage deckt alle Produktionsschritte ab: von der Rohstoffauflösung über Vorstufen, Kalzinierung und Reinigung bis zur finalen Qualitätsprüfung und Verpackung. Alle Prozesse sind digitalisiert und generieren so Daten für KI-gestützte Analysen, die die Materialentwicklung beschleunigen. Powder-Up! steht Partnern aus Wissenschaft und Industrie offen, um gemeinsam neue Batteriematerialkonzepte zu entwickeln und die heimische Batteriefertigung zu stärken – alles »Made in Germany«.

POWDER-UP! CATHODE PILOT PLANT: COMMISSIONING AND INITIAL PROJECTS

In mid-2025, the ZSW commissioned the »Powder-Up!« pilot plant in Ulm – a lighthouse project to support science and industry in the development of sustainable energy storage materials. Its construction was supported by funding from the German federal government and the Baden-Württemberg state government. Researchers at the pilot plant are developing innovative (low-cobalt and energy-rich) cathode materials for lithium-ion batteries, producing them in batches of up to 100 kg. Such quantities are needed to build large-scale battery cells. The plant covers all production steps, from raw material dissolution to preliminary stages, calcination and cleansing, through to the final quality checks and packaging. All processes are digitalised and therefore generate data for AI-powered analyses designed to accelerate material development. Powder-Up! is open to partners from science and industry interested in jointly developing new battery material concepts and strengthening domestic battery manufacturing – with everything »Made in Germany«.

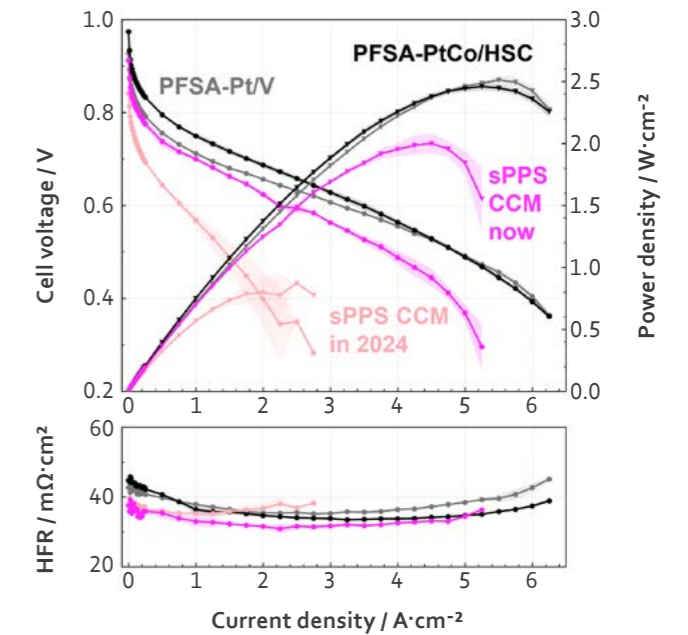
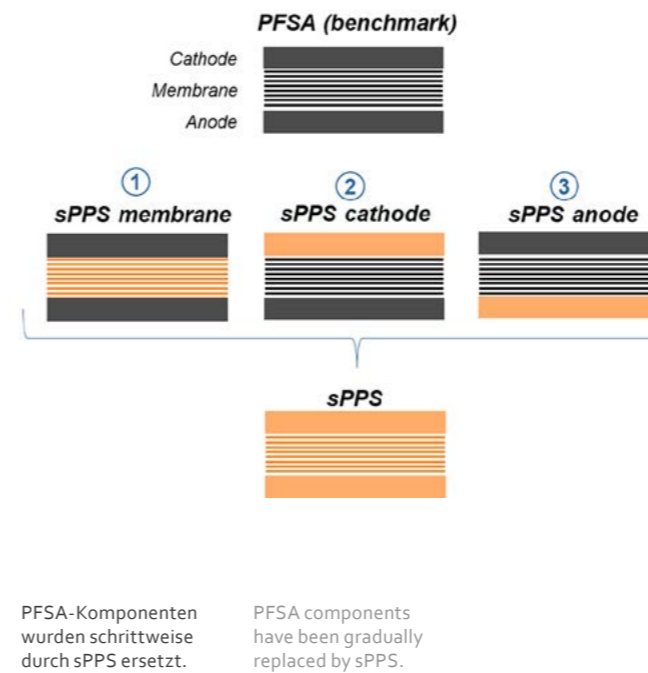


FLUORFREIE, IONENLEITENDE POLYMERE FÜR PEM-TECHNOLOGIEN

Der langfristige Einsatz perfluorierter, ionenleitender Materialien (PFSA) in PEM-Brennstoffzellen und PEM-Elektrolyseuren ist aufgrund eines EU-weiten Verbotes unsicher. Fluorfreie Alternativen erfordern jedoch eine grundlegende Anpassung der Fertigung und Konditionierung. In einem dreijährigen Forschungsprojekt wurde daher die Herstellung von Membranen und Elektroden auf Basis sulfonierten Polyphenylensulfons (sPPS) systematisch optimiert. Durch die schrittweise Anpassung einzelner Schichten entstand eine vollständig fluorfreie Membran-Elektrodeneinheit, deren Leistungsdaten nahezu das Niveau der PFSA-Referenz erreichen. Die Abbildung zeigt den Leistungszuwachs durch den sukzessiven Austausch von PFSA-Komponenten durch sPPS (pinke Kurve). Um die verbleibende Lücke zur PFSA-Referenz zu schließen, wurde bereits ein Folgeprojekt gestartet.

FLUORINE-FREE ION-CONDUCTING POLYMERS FOR PEM TECHNOLOGIES

The long-term use of perfluorinated, ion-conducting materials (PFSA) in PEM fuel cells and PEM electrolyzers is uncertain due to an EU-wide ban on such materials. However, fluorine-free alternatives require fundamental adjustments to manufacturing and conditioning processes. A three-year research project therefore sought to systematically optimise membrane and electrode manufacturing on the basis of sulfonated polyphenylene sulfones (sPPS). The gradual adaptation of individual layers yielded a fully fluorine-free membrane electrode assembly, which achieved performance figures close to PFSA benchmarks. The figure below visualises the performance increase achieved by gradually replacing PFSA components with sPPS alternatives (pink curve). A successor project has been launched to close the remaining gap to PFSA benchmarks.



Vergleich der fluorfreien MEA mit dem PFSA-Benchmark (schwarz/grau), dem Ausgangszustand 2024 (orange) und dem optimierten Stand (pink). Comparison of the fluorine-free MEA with the PFSA benchmark (black/grey), the baseline scenario for 2024 (orange) and the optimised scenario (pink).



Durch die schrittweise Anpassung einzelner Schichten entstand eine vollständig fluorfreie Membran-Elektrodeneinheit, deren Leistungsdaten nahezu das Niveau der PFSA-Referenz erreichen.

The gradual adaptation of individual layers yielded a fully fluorine-free membrane electrode assembly, which achieved performance figures close to PFSA benchmarks.



Das WINSENT-Testfeld erzielte einen wichtigen Erfolg: Mit realen Schwingungsdaten aus gezielten Anlagenbetrieben konnten Simulationstools erfolgreich validiert werden.

SEISMOLOGISCHES LARGE-N-EXPERIMENT AM WINDENERGIE-FORSCHUNGSTESTFELD WINSENT

Das europäische Einstein-Teleskop wird als Gravitationswellen-Detektor der dritten Generation in Form eines unterirdischen Teleskops in der Grenzregion Belgien/Niederlande/Deutschland errichtet. Um präzise Forschungsergebnisse zu liefern, benötigt es einen Standort frei von Störfaktoren in der Umgebung. Zur Standortfindung muss der Einfluss möglicher Störquellen vorab simuliert werden. Dies erfolgt über spezielle Softwaretools zu numerischen Simulationen der Ausbreitung von Wellenfeldern im Untergrund. Hier leistete das WINSENT-Testfeld in einem Large-N-Experiment mit Hunderten seismischen Messstationen am Testfeld und in dessen Umfeld einen wichtigen Beitrag zur Validierung der Simulationstools – mit echten Messdaten, die über eine gesteuerte Betriebsführung und -art der beiden Forschungs-windenergieanlagen zur aktiven Einbringung von Schwingungen in den Untergrund erzeugt wurden.

The WINSENT test field achieved a major success: Real vibration data from targeted turbine operations enabled the successful validation of simulation tools.

SEISMOLOGICAL LARGE-N EXPERIMENT AT THE WINSENT TEST SITE

The planned European Einstein Telescope is a third-generation underground gravitational wave telescope located in the border area of Belgium, the Netherlands and Germany. A site free from disruptive factors is essential for the telescope to produce precise research findings. The site identification process includes simulating the influence of potential sources of disruption. This relies on specialist software tools to conduct numerical simulations of how wave fields spread underground. In a large-N experiment, the WINSENT test site made a valuable contribution to validation of the simulation tool. Hundreds of seismic measurement stations were installed on the test site and in the surrounding area – with real data generated through controlled operation of the research site's two wind turbines to actively introduce vibrations into the subsoil.



Positionierung der Messstationen im und um das Testfeld.

The measurement stations' positions on and around the test site.



Skalierbarer, generischer Brennstoffzellenstack für Entwicklungen im Stack- und Systembereich im Teststand (als Kurzstack).

A scalable generic fuel cell stack for stack and system development, shown here on a test bench (as a short stack).

ERFOLGREICH, GEFRAGT, INDUSTRIENAH: DER GENERISCHE STACK

Das ZSW in Ulm stellt ein offenes Brennstoffzellen-Stackdesign nach dem Stand der Technik für FuE-Anwendungen bereit. Als Kernelement der Brennstoffzellen-Forschungsfabrik HyFaB unterstützt es die Entwicklung im Stack- und Systembereich sowie bei Zellkomponenten. Das Design ist skalierbar bis über 150 Kilowatt, liefert eine hohe Leistung über einen breiten Betriebsbereich und eignet sich auch für mobile Anwendungen. Komponenten und Stacks stehen für nicht kommerzielle FuE-Anwendungen frei zur Verfügung. Die Plattform wird in allen HyFaB-Aktivitäten genutzt, dient als Forschungsplattform in Förderprojekten mit Industriebeteiligung und ist Standard bei Partnern aus den Fraunhofer- oder Helmholtz-Instituten. Die Nachfrage ist erfreulich hoch: nahezu 60 Stacks unterschiedlicher Größe wurden bereits an Partner aus Forschung und Industrie abgegeben.

SUCCESSFUL, SOUGHT-AFTER AND INDUSTRY-ORIENTED: THE GENERIC STACK

ZSW Ulm offers a state-of-the-art generic fuel cell stack design for R&D applications. As a core element of the HyFaB research factory for fuel cells, it supports development activities focused on the stack, the system and cell components. The design is scalable to over 150 kilowatts, delivers high performance across a wide operating range and is also suitable for mobile applications. Components and stacks are freely available for non-commercial R&D applications. The platform is used in all HyFaB activities, serves as a research platform in publicly funded projects with industry participation and is now the gold standard for partners at Fraunhofer and Helmholtz institutes. The demand for the platform has been high, with almost 60 stacks of various sizes delivered to research and industry partners to date.



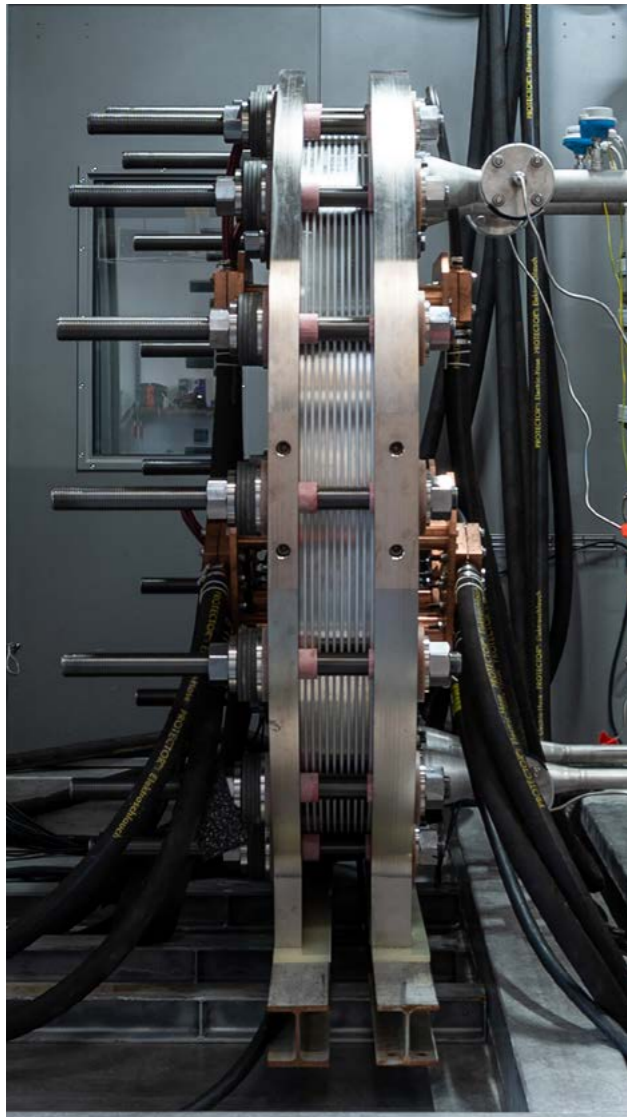
Die Nachfrage nach dem generischen Stack ist erfreulich hoch: nahezu 60 Stacks unterschiedlicher Größe wurden bereits an Partner aus Forschung und Industrie abgegeben.

Demand for the generic stack has been high, with almost 60 stacks of various sizes handed over to research and industry partners to date.



Der generische Stack mit 100 kW, bestehend aus 332 Einzelzellen.

The generic stack with 100 kW capacity, comprising 332 individual cells.

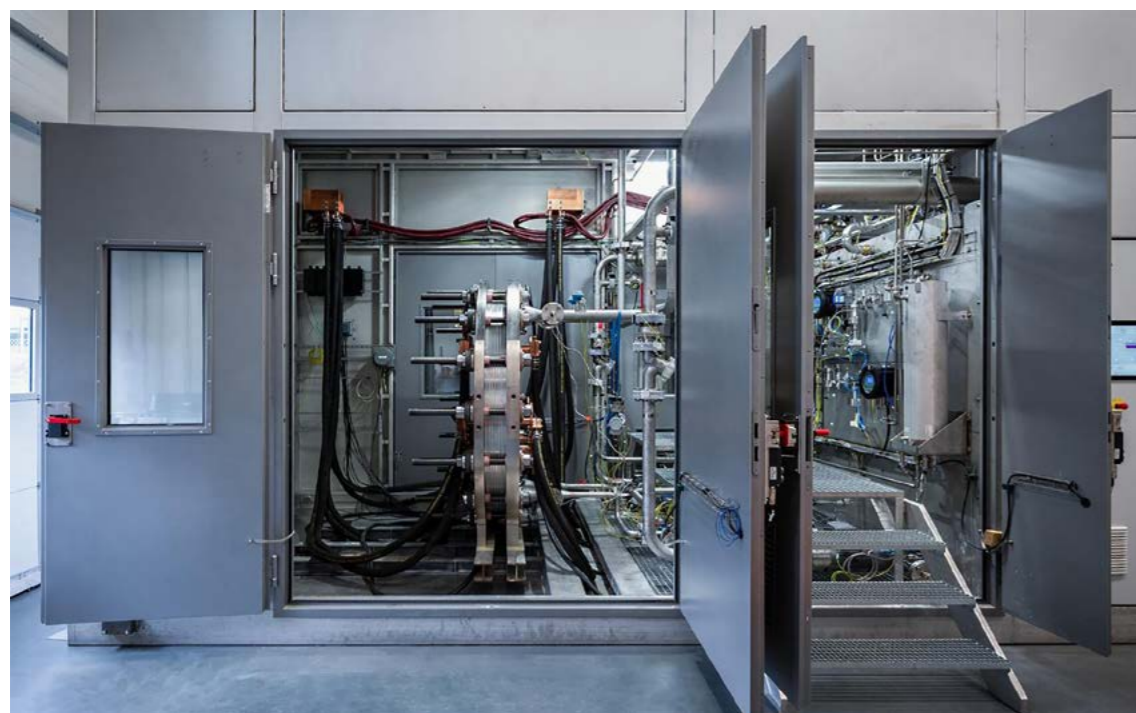


MEGASTACK-BW ERFOLGREICH IN BETRIEB

Ziel des vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts MegaStack-BW war die Skalierung der Elektrolysestacktechnologie des ZSW (alkalische Elektrolyse, 0,5 MW_{el}, 2.750 cm² Zellfläche) mit Hilfe von Industrie-4.0-Methoden, um bei der Skalierung der Bauteile Zeit und Kosten zu sparen. In Zusammenarbeit mit mehreren Industriepartnern aus Baden-Württemberg wurde eine Skalierungsmethodik und darauf aufbauend ein um den Faktor 5 skaliertes Stackdesign (ca. 14.000 cm² aktive Zellfläche, Leistungsklasse ca. 2,5 MW_{el}) entwickelt. Der »MegaStack-BW« wurde Ende 2025 in Form eines Prototyps (Kurzstack mit Zellen) aufgebaut, in einem ElyLab-Prüfstand am ZSW erfolgreich in Betrieb genommen und bisher über mehrere hundert Stunden betrieben.

MEGASTACK-BW SUCCESSFULLY OPERATIONALISED

The MegaStack-BW project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs aimed to scale ZSW electrolysis stack technology (alkaline electrolysis, 0.5 MW_{el}, 2,750 cm² active cell area) by drawing on Industry 4.0 methods to save time and cut costs in component scaling. A scaling methodology was developed in collaboration with numerous industry partners in Baden-Württemberg. This achieved a stack design augmented by a factor of 5 (approx. 14,000 cm² active cell area, performance class approx. 2.5 MW_{el}). A »MegaStack-BW« prototype was constructed in late 2025 (as a short stack with cells), taken into operation on a test bench in the ZSW ElyLab and has since logged several hundred operating hours.



Testbetrieb des MegaStack-BW in einem ElyLab-Prüfstand am ZSW.

Test operation of the MegaStack-BW system on an ElyLab test bench at the ZSW.

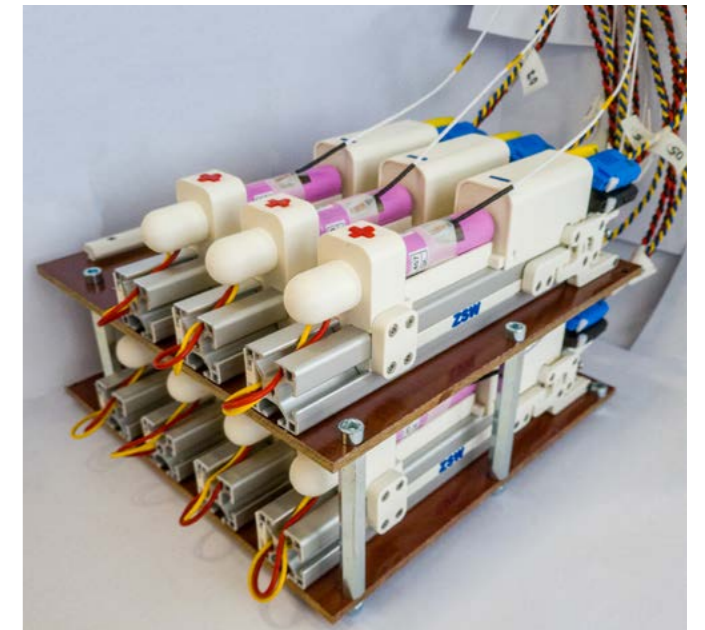


Schnell, sicher, modular: Der neue Zellhalter fixiert zylindrische Batteriezellen zuverlässig und erleichtert den Laboralltag erheblich.

Fast, secure, modular: The new cell holder reliably fixes cylindrical battery cells and significantly simplifies everyday lab work.

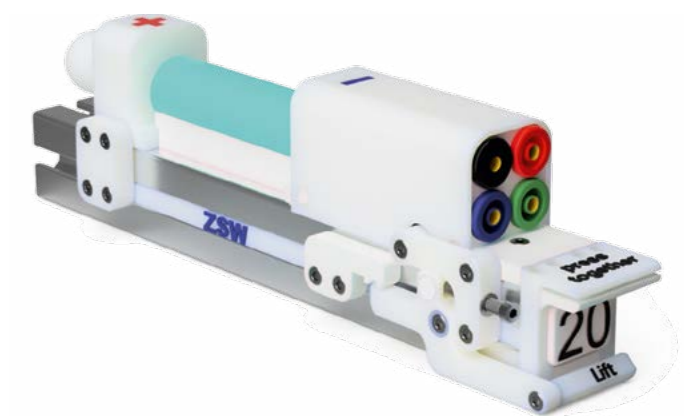
CLICK-AND-TEST: NEUER ZELLHALTER FÜR ZYLINDRISCHE BATTERIEZELLEN

Der Betrieb eines großen Batterietestzentrums erfordert unter anderem den schnellen und zuverlässigen Umbau von Testaufbauten. Unterschiedliche Zelltypen und -formate erfordern passgenaue Kontaktierungen. Herkömmliche Testhalter fixieren Zellen meist mit Schrauben oder mit Bändern, erlauben keine präzise Einstellung des Anpressdrucks und sind sperrig – ein zeitaufwendiges Hindernis im Laboralltag. Hier setzt ein neuer Zellhalter des ZSW an. Wissenschaftlich geprüft und erfolgreich erprobt, ermöglicht er eine schnelle und sichere Fixierung von zylindrischen 18650- und 21700-Zellen. Der Halter ist modular kombinierbar, stapelbar und besitzt eine eindeutige Polarität. Er hält Dauerströme bis 10,5 A (optional 50 A) sowie Temperaturen bis 70 °C stand. Eine Patentanmeldung wurde eingereicht. Der Zellhalter wird in Eigenfertigung hergestellt und ist auch kommerziell erhältlich.



CLICK-AND-TEST: NEW CELL HOLDER FOR CYLINDRICAL BATTERY CELLS

An important part of operating a large-scale battery test centre is rapid and reliable conversion of test set-ups. Precisely fitting contacts are needed for different cell types and formats. Conventional test holders usually hold cells in place using screws or bands, do not permit precise adjustment of contact pressure and are also unwieldy, presenting a time-consuming hindrance in day-to-day laboratory work. This is where the new cell holder from ZSW Ulm comes in. Following scientific verification and successful testing, it facilitates swift and secure fixation of cylindrical 18650 and 21700 cells. The holder can be combined or stacked in a modular system, features clear polarity and can withstand constant currents of up to 10.5 A (or, optionally, 50 A) and temperatures up to 70 °C. A patent application has been filed. The cell holder is manufactured in house and is also commercially available.



ZSW-Entwicklung: Verschraubungsfreier Zellhalter für zylindrische Batteriezellen.

A ZSW development: Screwless cell holder for cylindrical battery cells.

> Mehr Infos auf S. 59

> For more details, turn to p. 59



Strahlende Gesichter bei der Preisverleihung am 8. Mai in Stuttgart.

Beaming faces at the awards ceremony on 8 May in Stuttgart.

10-JÄHRIGES JUBILÄUM DES »LEITSTERNS ENERGIEEFFIZIENZ« MIT REKORDTEILNAHME

Im Mai 2025 fand zum zehnten Mal die Preisverleihung zum »Leitstern Energieeffizienz« im Haus der Architekten in Stuttgart statt. Grundlage für die Auszeichnungen ist ein vom ZSW entwickeltes umfangreiches Indikatorenset zur Bewertung der Energieeffizienz in den Stadt- und Landkreisen Baden-Württembergs. Im Jubiläumsjahr hatten mit 41 von 44 so viele Kreise wie nie zuvor am Wettbewerb »Leitstern Energieeffizienz« des Umweltministeriums des Landes Baden-Württemberg teilgenommen. Den ersten Platz erreichte der Schwarzwald-Baar-Kreis, der sich über die letzten Jahre kontinuierlich an die Spitze gearbeitet hat. Auf Platz zwei kamen punktgleich der Landkreis Göppingen und der Ortenaukreis, der erst zum zweiten Mal am Wettbewerb teilnahm. Den dritten Platz belegte der Landkreis Böblingen, ein Dauerkandidat auf der Siegertreppe.

TENTH ANNIVERSARY OF »LEITSTERN ENERGIEEFFIZIENZ« ATTRACTS RECORD ENTRIES

In May 2025, the awards ceremony for the tenth edition of the »Leitstern-Energieeffizienz« (Energy Efficiency Guiding Star) programme took place at Haus der Architekten in Stuttgart. The awards are based on a set of indicators developed by the ZSW to assess district authorities' energy efficiency. In this anniversary year, 41 of Baden-Württemberg's 44 district authorities took part in the contest »Leitstern-Energieeffizienz« hosted by the State Ministry for the Environment, Climate and Energy Sector. First place went to Schwarzwald-Baar-Kreis, a district that has continuously forged ahead in recent years. The district of Göppingen tied in second place with Ortenau, which was participating in the contest for the first time. Third place went to the district of Böblingen, which regularly appears on the podium.



Das ZSW verfügt mit seiner neuen Rolle-zu-Rolle-Anlage über herausragende Möglichkeiten zur Entwicklung flexibler Perowskit-Dünnschichtmodule in industrierelevanter Umgebung.

With its new roll-to-roll system, the ZSW possesses leading capabilities in Germany for the development of flexible perovskite thin-film modules in industrial settings.

Rolle-zu-Rolle (R2R)-Beschichtungsanlage für flexible Perowskit-Module.

Roll-to-roll (R2R) coating system for flexible perovskite modules.

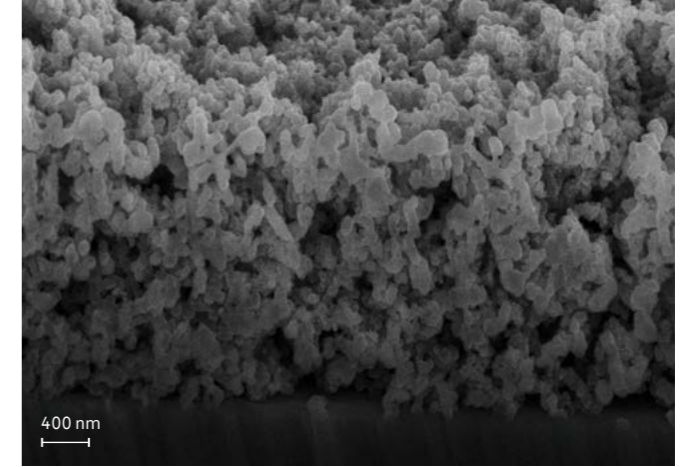


NACHHALTIGE PROZESSIERUNG VON PEROWSKIT-SOLARZELLEN

Die Schlitzgussbeschichtung gilt als Schlüsseltechnologie für die skalierbare Herstellung von Perowskit-Solarzellen. Sie ermöglicht die präzise und gleichmäßige Abscheidung dünner Schichten auf großen Flächen und bietet in Kombination mit grünen Lösungsmitteln einen nachhaltigen Ansatz für die industrielle Produktion von Perowskit-Solarzellen. Am ZSW gelang es bereits, vier der sechs funktionalen Schichten mit Schlitzguss und grünen Lösungsmitteln ohne Effizienzverlust zu prozessieren. Ende 2025 wurde zudem eine Rolle-zu-Rolle-Anlage in Betrieb genommen, die die kontinuierliche Abscheidung auf flexiblen Substraten erlaubt. Das ZSW verfügt damit in Deutschland über herausragende Möglichkeiten zur Entwicklung flexibler Perowskit-Dünnschichtmodule in industrierelevanter Umgebung. Das Vorhaben wurde im Projekt PeroTec2 durch das Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg gefördert.

SUSTAINABLE PROCESSING OF PEROVSKITE SOLAR CELLS

Slot-die coating is a key technology for the scalable manufacturing of perovskite solar cells. It enables the precise and even deposition of thin layers across large areas and, in combination with »green« solvents, offers a sustainable approach through which to produce perovskite solar cells at industrial scale. Researchers at the ZSW have already succeeded in producing four of the six functional layers with slot-die coating and green solvents – with no efficiency losses. In addition, the ZSW commissioned a roll-to-roll system in late 2025, which permits continuous deposition onto flexible substrates. As a result, the ZSW possesses leading capabilities in Germany for the development of flexible perovskite thin-film modules in industrial settings. The PeroTec2 project received funding from the Baden-Württemberg Ministry for the Environment, Climate and Energy Sector.



REM-Aufnahme von FIB-Schnitt: die mit Pt/C beschichtete Membran zeigt gute Haftung und homogene Schichten.

SEM image of a FIB section: the Pt/C-coated membrane displays good adhesion and homogeneous layers.

ZUKUNFTSFELD DÜNNSCHICHTTECHNOLOGIE IN DER AEM-ELEKTROLYSE

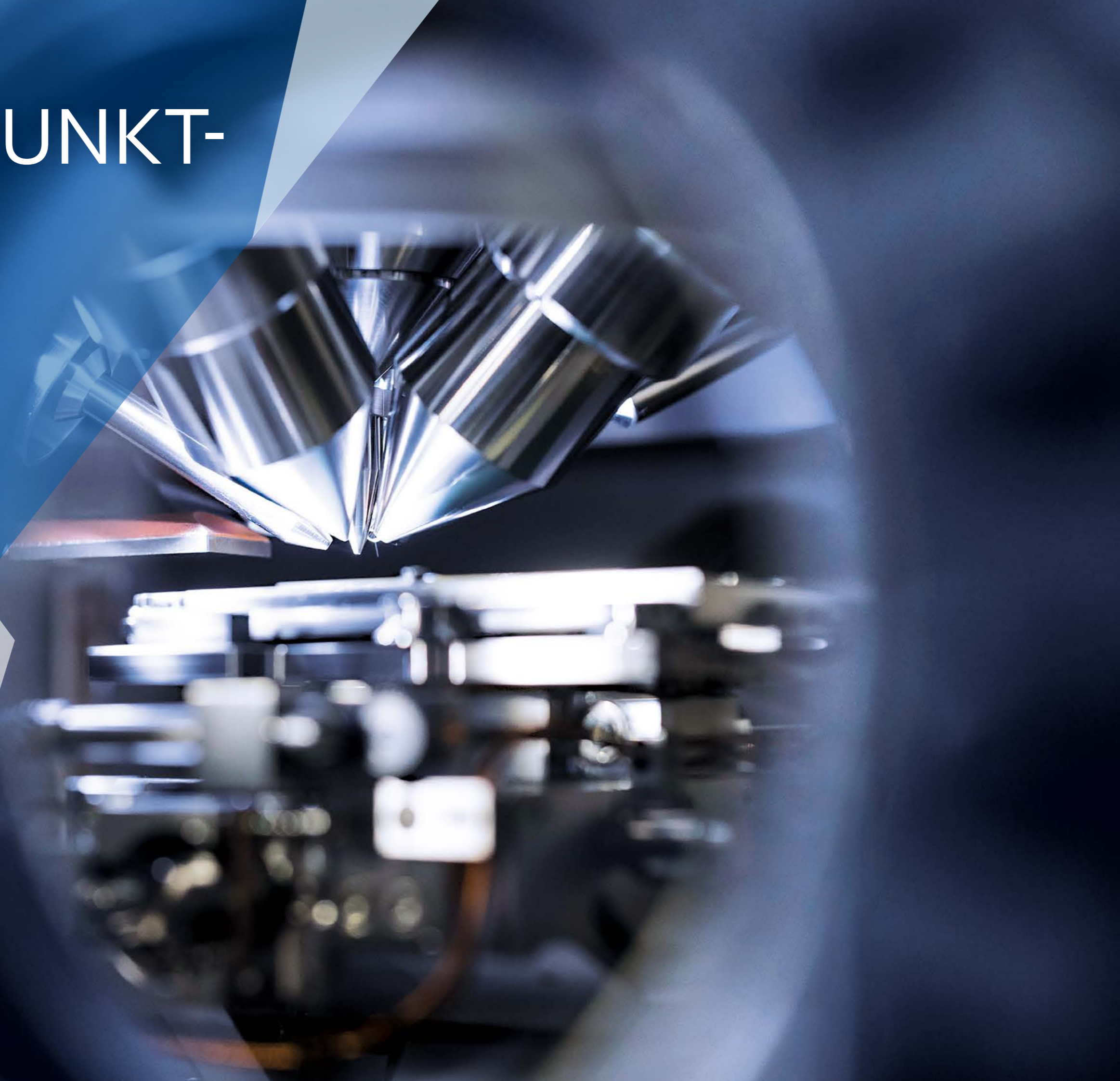
Das bereits für die Herstellung von Perowskit-Solarzellen erfolgreich angewandte kostengünstige Schlitzgussverfahren wurde auf die Herstellung von Anionenaustauschmembran-Elektrolyse-Einheiten (AEMEL) übertragen. Im Fokus standen die Entwicklung geeigneter Katalysatortinten sowie die Beschichtung von Membranen mit einem Raket-Verfahren, das sich durch hohe Materialeffizienz und gute Skalierbarkeit mit dem Schlitzgussverfahren auszeichnet und somit ein hohes Kostenreduktionspotenzial bietet. Erste funktionelle Beschichtungen, auch ohne teuren Edelmetallkatalysator als weiteren Kostentreiber, zeigten Leistungen nahe des State of the Art. Die Arbeiten legen damit eine wichtige Grundlage für die Kostenreduktion und Skalierung der AEM-Technologie.

FUTURE-FOCUSED THIN-FILM TECHNOLOGY IN AEM ELECTROLYSIS

The cost-efficient slot-die coating process already successfully deployed in the production of perovskite solar cells has been translated to the production of anionic exchange membrane electrolysis (AEMEL) systems. The focus of this work was developing suitable catalyst inks and coating membranes in a Raket process, which is characterised by high material efficiency and offers good scalability with the slot-die coating process, and thus presents high cost-reduction potential. The first functional coatings, without catalysts made from expensive noble metals, achieved performance close to the state of the art. This work therefore provides an important foundation for reducing costs and scaling AEM technology.

SCHWERPUNKT- BERICHT

FOCUS REPORT

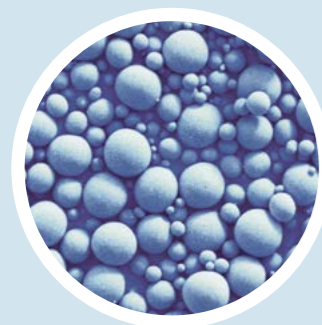


Zwischen Mikroskop und Megawatt:

wie Materialanalytik die Energiewende antreibt

Der weltweit wachsende Rohstoffbedarf für erneuerbare Energietechnologien wie Batteriespeicher, Elektrolyseure oder Photovoltaik stellt die Energiewende vor große Herausforderungen. Geopolitische Risiken, begrenzte Verfügbarkeiten und steigende Umwelt- und Kostenbelastungen verschärfen die Situation zusätzlich. Vor diesem Hintergrund rückt das Ziel in den Fokus, den Materialeinsatz pro erzeugter Kilowattstunde Nutzenergie zu minimieren, Umwelt- und Versorgungsrisiken zu reduzieren und Stoffkreisläufe konsequent zu schließen. Moderne Hightechanalytik ist ein zentraler Hebel für die gezielte Entwicklung von Materialien für robuste, effiziente und nachhaltige Energietechnologien, ist aber auch weit über den Energiebereich nutzbar.

Rising demand around the world for renewable energy technologies such as battery storage systems, electrolysers and photovoltaic modules presents major challenges to the energy transition. Geopolitical risks, limited availability, increasing environmental impacts and rising costs further exacerbate the situation. These factors bring the objectives into sharp focus, namely minimising material use per kilowatt-hour of useful energy generated, reducing environmental and supply risks and systematically closing material cycles. Modern high-tech analytics represents a key lever to promote the targeted development of materials for robust, efficient and sustainable energy technologies. However, the potential applications extend far beyond the energy industry.



REM-Aufnahme des Kathodenpulvers einer Lithium-Ionen-Batterie.

An SEM image of the cathode powder for a lithium-ion battery.

From microscopes to megawatts:

How material analysis is driving the energy transition

MATERIALANALYTIK: DER UNSICHTBARE MOTOR DER ENERGIEWENDE

Analytische Methoden unterstützen die Entwicklung von verlässlichen, marktfähigen Technologien und weisen nach, ob Solarzellen, Batterien, Elektrolyseure, Windenergieanlagen oder Brennstoffzellen effizient, ressourcenschonend und langzeitstabil arbeiten. Somit ist die Analytik mitbestimmend, ob Klimaziele erreichbar sind, Versorgungssicherheit gelingt und Energiekosten beherrschbar bleiben. In einer Welt begrenzter Rohstoffe ist die Materialanalyse unerlässlich, um Alternativen zu qualifizieren – sei es, kritische Elemente zu reduzieren oder Recyclingpfade frühzeitig zu berücksichtigen.

In der Energietechnik ist Analytik keine Hilfsdisziplin mehr, sondern hat eine strategische Schlüsselfunktion über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg: von der Materialsynthese im Labor über die Hochskalierung im Technikum bis zur Qualitätssicherung von Produkten und der Fehleranalyse im Feld. Am ZSW zeigt sich das etwa in der Photovoltaik- und Batterieforschung, wo Struktur-, Defekt- und Oberflächenanalysen helfen, Perowskit-Solarzellen stabiler zu machen, Alterungsmechanismen aufzuklären und Prozessfenster für industrielle Beschichtungen zu definieren. Auch lassen sich so die Energiedichte und Lebensdauer von Batterien erhöhen und der Einsatz kritischer Rohstoffe senken.

Gleichzeitig verändert der digitale Wandel die Analytik selbst. Moderne Bildgebungsverfahren, In-situ-Methoden und große Messdatensätze verlangen Auswertungen, in denen Mensch und Maschine eng verzahnt sind: KI-gestützte Algorithmen finden Muster in Messdaten, die dem Auge entgehen, Expertinnen und Experten ordnen sie physikalisch ein und übersetzen sie zeitnah in bessere Materialien und Prozesse. So entsteht eine neue Qualität der Analytik – und ein entscheidender Hebel für eine nachhaltigere und resilientere Energiewelt.

MATERIAL ANALYSIS: THE INVISIBLE ENGINE OF THE ENERGY TRANSITION

Analytical methods are an invisible engine of the energy transition, supporting the development of reliable, market-ready technologies and verifying whether solar cells, batteries, electrolysers, wind turbines and fuel cells can operate in an efficient and resource-conserving manner with enduring stability. Materials analyses thus help define attainability of climate targets, the feasibility of supply security and the controllability of energy costs. In a world of finite raw materials, materials analysis is essential to qualify alternatives, whether the aim is to lower levels of critical elements or to incorporate recycling pathways from an early stage.

Analytic measurements no longer merely support energy engineering as an auxiliary discipline. Instead, it has a vital strategic function throughout the entire value chain, from lab-based material synthesis and pilot plant scaling to product quality assurance and fault analysis in the field. In photovoltaic and battery research at the ZSW, structural, defect and surface analyses are helping to make perovskite solar cells more stable, shed light on ageing mechanisms and define process windows for industrial coatings. Analytics also makes it possible to increase the energy density and useful life of batteries and to reduce the use of critical raw materials.

At the same time, the digital transformation is changing the field of analytics itself. Modern imaging techniques, in situ methods and large datasets call for analytical processes in which humans and machines are closely linked. While AI-assisted algorithms identify patterns in data that would escape the human eye, experts perform physical classifications and swiftly translate insights into improved materials and processes. The result is a new dimension of analytical quality – and a decisive lever for a more sustainable and resilient energy world.



Für ein einziges PV-Modul für Hausdächer benötigt man die vierfache Menge Silizium wie hier abgebildet ist. 300 g Silizium entsprechen 100 Watt PV-Leistung.

A single domestic roof-mounted PV module requires four times the amount of silicon shown here. For context, 300 g of silicon corresponds to 100 W of PV capacity.



**HIGHTECH FÜRS KLIMA:
AKTUELLER STAND DER TECHNIK AM ZSW**

Von Batterien über Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Wasserstoffanalytik bis zur Photovoltaik bündelt das ZSW Kompetenzen. Es stehen in den entsprechenden Fachgebieten spezialisierte analytische Mess- und Prüfsysteme zur Verfügung, die gezielt auf die jeweiligen Forschungs- und Anwendungsfragestellungen abgestimmt sind. Diese Anlagen werden von qualifizierten Fachkräften betrieben, welche über langjährige Erfahrung in der Messmethodik und Datenauswertung verfügen. Dabei führt eine enge organisatorische Verzahnung der Fachbereiche zu kurzen Abstimmungsprozessen und einer schnellen Überführung der Ergebnisse in belastbare wissenschaftliche und technologische Erkenntnisse.

So stehen in der Brennstoffzellentechnik und Wasserstoffforschung die Entwicklung und Erprobung von Katalysatoren, Elektroden u. v. m. im Mittelpunkt. Die Arbeiten umfassen dabei auch die gezielte Untersuchung der eingesetzten katalytischen Materialien, Membranen und Komponenten.

Im Bereich Batterien reichen die Aktivitäten von der Entwicklung und Charakterisierung neuer Materialien über die Zellproduktion auf Pilot- und industriellem Maßstab bis hin zur Prozess- und Produktionsforschung. Die Analytik ermöglicht hier die Untersuchung elektrochemischer Prozesse und Materialdegradation über den gesamten Lebenszyklus hinweg. So können die Proben beispielsweise in Post-mortem-Analysen über rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen auf strukturelle Schäden oder deren elementare Zusammensetzung (via EDX) untersucht werden. Die Photovoltaik ist ein weiteres zentrales Forschungsfeld des ZSW. In diesem Bereich werden Schichtstrukturen, Defektmechanismen und Wirkungsgradverluste analysiert, um langlebige und effiziente Solarmodule zu entwickeln.

Zudem schafft die vorhandene Expertise die Voraussetzung für nachhaltige Recycling- und Kreislaufkonzepte, indem Materialzusammensetzungen präzise erfasst und Rückgewinnungsstrategien datenbasiert ausgelegt werden. Die Analytik trägt auch hier maßgeblich dazu bei, Prozesse zu entwickeln und zu verbessern.

Insgesamt verfolgt das ZSW einen Ansatz von der Materialforschung bis hin zur industrienahen Umsetzung, um die entsprechenden Verfahren erfolgreich in die Praxis zu überführen. Die folgenden Fallbeispiele sollen einen tieferen Einblick in diese Tätigkeiten liefern.

**CLIMATE-FRIENDLY HIGH-TECH:
STATE-OF-THE-ART SYSTEMS AT THE ZSW**

From batteries, electrolyzers and fuel cells to hydrogen analysis and photovoltaics, the ZSW brings together wide-ranging expertise. In each of these fields, the ZSW has specialist analytical measurement and testing systems at its disposal, tailored to specific research questions and application topics. These systems are operated by highly qualified specialists with years of experience in measurement techniques and data analysis. Close organisational links between specialist areas support short coordination processes and make it possible to translate findings swiftly into robust scientific and technological insights.

In fuel cell technology and hydrogen research, the ZSW focuses on development and testing. Its work in these areas also includes targeted examination of catalytic materials, membranes and other components.

Battery-related activities extend from developing and characterising new materials to producing cells at pilot and near-industrial scale through to process and production research. In this context, analytics facilitates the examination of electrochemical processes and material degradation across the entire life cycle. Samples can be subjected, for example, to post-mortem analyses, with scanning electron microscopes used to look for structural damage or determine elemental composition (via EDX).

Photovoltaics represents another core field of research at the ZSW. Researchers analyse layer structures, defect mechanisms and efficiency losses to support development of durable and efficient solar modules.

In addition, the ZSW's expertise lays the foundations for sustainable recycling and closed-loop concepts by precisely determining material compositions and developing data-based material recovery strategies. Analytics also plays an important role in developing and improving such processes.

Overall, the ZSW's approach extends from material research to industrial application with the aim of successfully translating processes and techniques into practice. The following case studies provide deeper insights into these activities.



< FIB-SEM-Analytik im Ulmer Labor: Hochauflösende Material- und Oberflächenanalyse mit fokussiertem Ionen- und Elektronenstrahl.

< FIB SEM analytics in the Ulm lab: High-resolution materials and surface analysis with focused ion and electron beams.



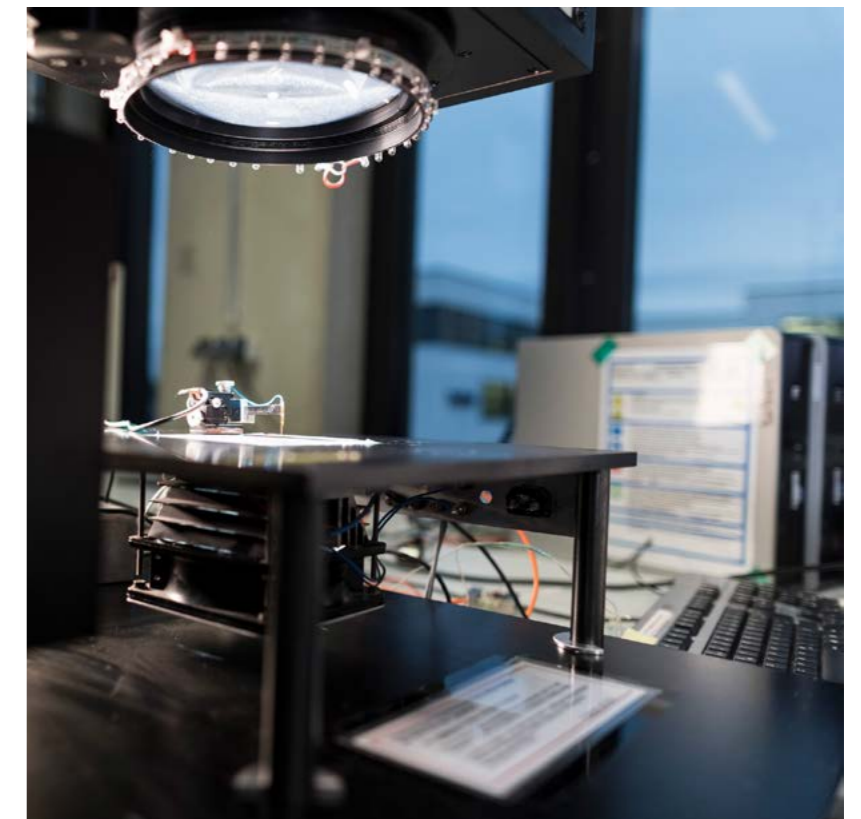
^ 3D-CT für die zerstörungsfreie Analyse interner (Batterie-) Zellstrukturen.

^ 3D-CT for non-destructive analysis of internal (battery) cell structures.



Das ZSW verfolgt den Ansatz von der Materialforschung bis hin zur industrienahen Umsetzung, um die entsprechenden Verfahren erfolgreich in die Praxis zu überführen.

The ZSW's approach extends from material research to industrial application with the aim of successfully translating processes and techniques into practice.

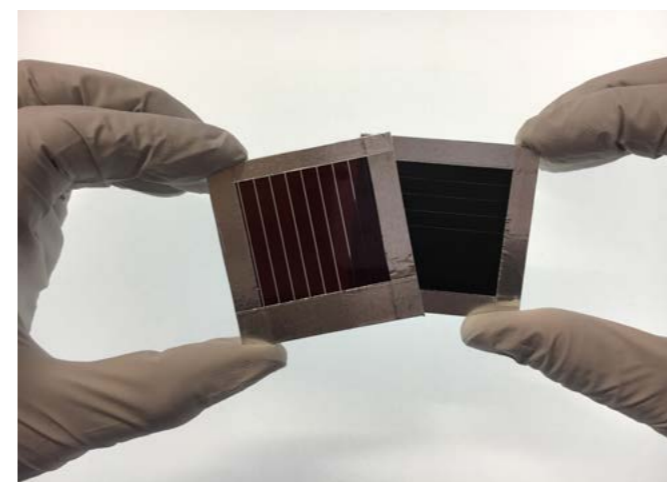
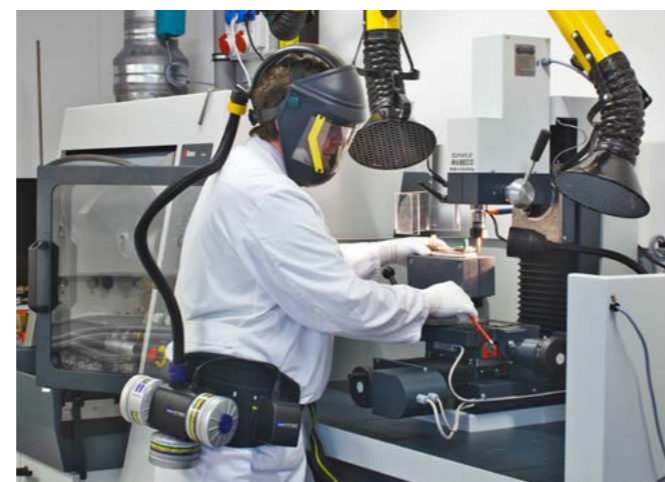


^ Sonnensimulator für Solarzellen am ZSW.

^ Sun simulator for solar cells at the ZSW.

> Arbeitsplatz für Zellöffnungen: Post-mortem-Analysen am ZSW.

> A workstation for cell openings: Post-mortem analyses at the ZSW.



< Einzelmodule für ein PV-Tandem – links Perovskit und rechts CIGS.

< Modules for tandem PV – left perovskite, right CIGS.

WASSERSTOFFQUALITÄTSANALYSE IM HYLAB

Im Zentrum dieses Fallbeispiels steht das Wasserstoffqualitätslabor HyLaB des ZSW, das die Qualität gasförmigen Wasserstoffs entlang der gesamten Bereitstellungskette untersucht und sichert. Grundlage dafür bildet die internationale Norm ISO 14687:2025, welche Reinheitsanforderungen für Brennstoffzellen-Wasserstoff in stationären und mobilen Anwendungen definiert. Im HyLaB werden vorgegebene Spurenkomponenten gemäß ISO-, EN- und DIN-Normen messtechnisch nachgewiesen. Eingesetzt werden etablierte Verfahren wie Gaschromatographie mit Flammenionisations- (FID), Pulsed-Discharge-Helium-Ionisations- (PDHID) und Elektroneneinfangdetektor (ECD) sowie hochsensitive optische Verfahren wie OFCEAS (Optical Feedback Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy). Damit lassen sich Verunreinigungen bis in den ppb-Bereich (parts per billion) nachweisen, etwa für Kohlenmonoxid, Schwefelverbindungen, halogenierte Stoffe oder Ammoniak. Die Nachweisgrenzen reichen typischerweise von 0,01 bis 1 µmol/mol. Das HyLaB entstand im Rahmen des vom Bundesverkehrsministerium geförderten Vorhabens »Hy-Lab« (2017 – 2020) als erstes unabhängiges Labor Deutschlands für den normkonformen Nachweis aller gasförmigen Kontaminationen. Zur Sicherstellung repräsentativer Ergebnisse entwickelte das ZSW im selben Projekt das Probennahmesystem HySam, das die internationalen Vorgaben der ISO 19880-9:2025 für Probenahmen an Wasserstofftankstellen erfüllt. In europäischen Projekten wie »HYDRAITE« und »HyQuality Europe« sowie dem vom Bundesverkehrsministerium geförderten Projekt »RingWaBe« wurde die Analytik weiterentwickelt und europaweit etabliert. Durch Validierungen nach ISO 21087:2019 und die Kooperation mit nationalen (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB, und Bundesanstalt für Materialforschung, BAM) und internationalen (National Physical Laboratory – England, NPL UK) metrologischen Instituten ist die Rückführbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse gewährleistet.



Die Expertinnen und Experten des Labors sind zudem in Normungsgremien (z. B. ISO TC 197 – WG 33) aktiv und begleiten die Weiterentwicklung internationaler Standards zur Qualitätssicherung von Wasserstoff.

Das ZSW bietet seit 2020 umfassende Analysedienstleistungen für industrielle Anwender an: von Wasserstoffproduzenten über die verteilende Infrastruktur bis zum H₂-Tankstellenbetreiber.

Die erzielte Analysentiefe und die Fähigkeit, die analytisch anspruchsvollste Qualitätsstufe »Grade D« zu prüfen, ermöglichen eine breite Anwendbarkeit für unterschiedliche Nutzungsszenarien, auch jenseits der Mobilität.

Aktuelle Herausforderungen liegen in der aufwandsintensiven Validierung der Methoden und der Kostenoptimierung des Analyseumfangs durch risikobasierte Prüfstrategien der Tankstellenbetreiber. Durch fortlaufende methodische Entwicklung und enge Kooperation mit der Industrie unterstützt das HyLaB den sicheren und kosteneffizienten Markthochlauf der Wasserstofftechnologien in Europa.

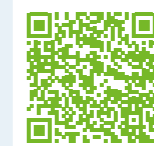
HYDROGEN QUALITY ANALYSIS AT HYLAB

HyLaB, the ZSW's laboratory for hydrogen quality, is at the heart of this case study. It examines and ensures the quality of hydrogen gas through the entire supply chain. This work is based on the international ISO 14687:2025 standard, which defines purity requirements for hydrogen destined for use in fuel cells in stationary and mobile applications.

HyLaB measures levels of specified trace components in line with ISO, EN and DIN standards. It uses established techniques including gas chromatography with flame ionisation detectors (FID), pulsed-discharge helium ionisation detectors (PDHID) and electron capture detectors (ECD), along with ultra-sensitive optical techniques such as optical feedback cavity-enhanced absorption spectroscopy (OFCEAS). This makes it possible to detect impurities in the parts per billion (ppb) range, including carbon monoxide, sulphur compounds, halogenated substances and ammonia. Detection limits typically range from 0.01 to 1 µmol/mol.

The HyLaB was constructed as part of the »HyLab« project (2017–2020) funded by the Federal Ministry of Transport (BMV) as Germany's first independent laboratory for detection of all gaseous contamination in compliance with relevant standards. In the course of that project, the ZSW developed the HySam sampling system in order to ensure representative results.

HySam complies with the international ISO 19880-9 2025 standard on sampling from hydrogen fuelling stations. Analytical methods have been established Europe-wide in the course of European projects such as »HYDRAITE« and »HyQuality Europe« as well as in the »RingWaBe« project funded by the Federal Ministry of Transport (BMV). Validations in line with ISO 21087:2019 and cooperation with metrological institutes both nationally (German National Metrology Institute – PTB; Federal Institute for Materials Research and Testing – BAM) and internationally (UK National Physical Laboratory – NPL UK) ensure the traceability and comparability of measurement results. In addition, the lab's experts actively contribute to standardisation bodies (e.g. ISO TC 197 – WG 33) and support the development of international standards to ensure the quality of hydrogen. Since 2020, the ZSW has offered comprehensive analysis services for industrial users, from hydrogen producers to distribution infrastructure to H₂ fuelling stations. The depth of analysis and the ability to examine »Grade D« hydrogen, which is the most analytically demanding, facilitates wide-ranging applications for different use scenarios – in the transport sector and beyond. Current challenges lie in the labour-intensive validation of methods and cost optimisation of analysis scope through risk-based testing strategies by petrol station operators. Thanks to its continuous methodological development and close cooperation with industry, HyLaB supports a safe and cost efficient market ramp-up for hydrogen technologies in Europe.



Weitere Infos
zum HyLaB

Further
information
about HyLaB

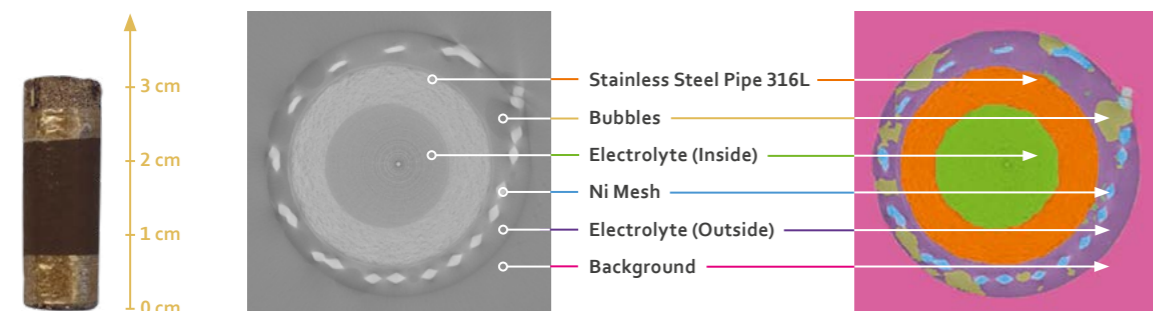


Dr. Vladimir Valter
vladimir.valter@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-366

Dr. Bettina Fuchs
bettina.fuchs@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-824

AUTOMATISIERTE AUSWERTUNG VON SYNCHROTRONAUFNAHMEN EINER ELEKTROLYSEZELLE MITTELS DEEP LEARNING

Das ZSW forscht im Bereich Wasserelektrolyse von der Materialentwicklung (Robo-MEA-Prep, gefördert durch das Umweltministerium Baden-Württemberg) bis zur Industrialisierung (BW-Elektrolyse, gefördert durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg). Dabei werden neuartige Designs erforscht, die durch einfachere Wartung, günstigere Materialien und geringere Kosten die Wasserstoffkosten senken. In dem in der Abbildung gezeigten Beispiel wurde eine rohrförmige alkalische Elektrolysezelle mit einer kathodenseitig beschichteten, ionenlösenden Membran und katalysatorbeschichteten rohrförmigen porösen Transportschicht (PTL) aufgebaut. Um Medientransporteigenschaften in Korrelation zur Wasserstoffherstellung zu untersuchen, wurde die Zelle mittels Synchrotron-Durchstrahlungsmessung am DESY in Hamburg in situ untersucht. Synchrotronstrahlung ermöglicht hochauflösende Abbildungen der Zellkomponenten (Ni-Streckmetall, Elektrolyt, Edelstahlrohr, Wasserstoffblasen) und dynamischer Prozesse. Mittels einer cloudbasierten Infrastruktur zum Trainieren von KI-Modellen und einem Softwarepaket zur Datenerfassung und -analyse mikroskopischer Aufnahmen erfolgte eine automatisierte Auswertung durch Segmentierung. Eine Histogramm-Segmentierung ist aufgrund geringer Graustufenabweichungen erschwert, da Elektrolyte in der gesamten Zelle vorliegen und im äußeren Bereich Überlagerungen von Elektrolyt, Streckmetall und Wasserstoffblasen auftreten. Mittels Deep Learning ist es jedoch möglich, durch pixelspezifisches Segmentieren ein Modell zur eindeutigen Klassifikation von Regionen zu erstellen. Beim Training werden hochpräzise einzelne Pixel Klassen zugeordnet – je sorgfältiger, desto genauer das Endergebnis. Nach mehrmaligem Training wird das Modell in einem Softwarepaket zur Datenerfassung und -analyse mikroskopischer Aufnahmen hochgeladen und die Segmentierung durchgeführt. Die Software gibt segmentierte Aufnahmen und prozentuale Zusammensetzungen aus. Durch Jobs kann die Segmentierung vollautomatisiert erfolgen.



Links: Synchrotronaufnahme eines porösen Elektrolyserohrs mit ionomergetragener Nickelbeschichtung; in der Mitte der Zellquerschnitt mit den zu segmentierenden Bereichen, rechts das Segmentierungsergebnis.

Left: Synchrotron image of a porous electrolyzer tube with ionomer-supported nickel coating; center shows the cell cross-section with the areas to be segmented, right the segmentation result.



Ildiko Lüdeking
ildiko.luedeking@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-823

Michael Liebert
michael.liebert@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-216

DEEP LEARNING-ASSISTED SYNCHROTRON ANALYSIS OF AN ELECTROLYSIS CELL

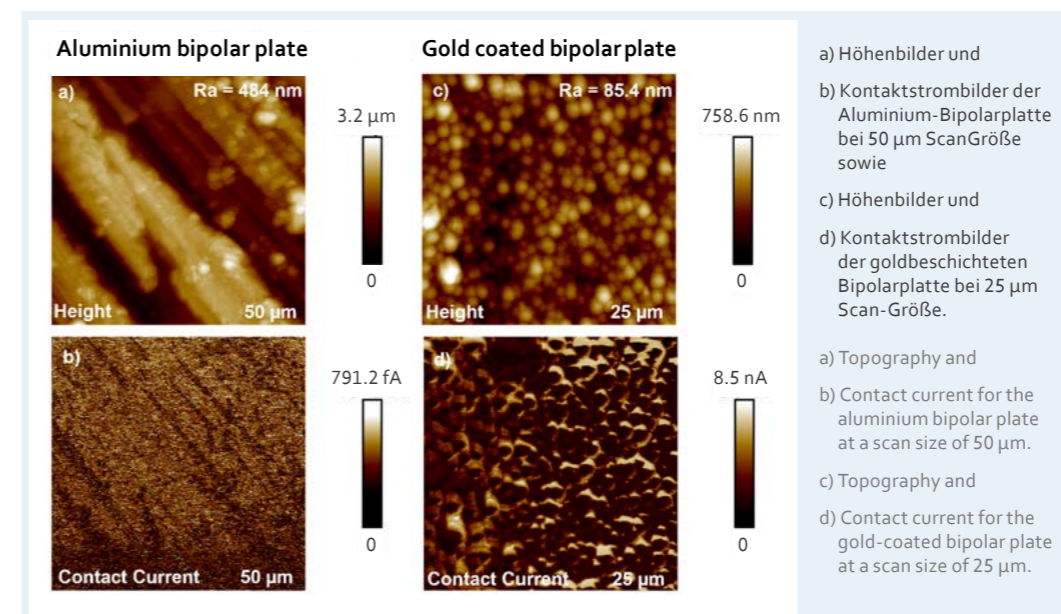
The ZSW conducts research into hydrogen electrolysis, ranging from material development (Robo-MEA-Prep, funded by the Ministry of the Environment Baden-Württemberg) to industrialisation (BW-Elektrolyse, funded by the Ministry of Economic Affairs Baden-Württemberg). This includes exploring novel designs with the potential to lower hydrogen prices through simpler maintenance, cheaper materials and lower operating costs. In the example shown in the figure, a tubular alkaline electrolytic cell has been assembled with an ion-conducting membrane coated on the cathode side and a catalyst-coated tubular porous transport layer (PTL). In order to examine media transport properties in correlation with hydrogen production performance, the cell was examined in-situ using synchrotron radiation detectors at the DESY Research Centre in Hamburg. Synchrotron radiation makes it possible to produce high-resolution images of cell components (e.g. nickel lath, electrolyte, stainless steel pipe and hydrogen bubbles) and dynamic processes. A cloud-based infrastructure for training AI models and a software suite for capturing and analyzing microscopic images were used to perform automated analysis through segmentation. Histogram segmentation is hampered by the minimal variation in shades of grey because electrolyte is present throughout the cell and electrolyte and because metal mesh and hydrogen bubbles are superimposed in the outer area. Using deep learning makes it possible to leverage pixel-specific segmentation to produce training models to clearly classify different regions. In the training process, individual pixels are precisely allocated to specific classes – and the more meticulous this allocation, the more precise the end result. After several rounds of training, the model is uploaded to the software suite for capturing and analyzing microscopic images and segmentation performed. The software produces segmented images and percentage compositions. This segmentation can also be fully automated.

FALLSTUDIE ZUR RASTERKRAFTMIKROSKOPIE

Die Rasterkraftmikroskopie Atomic Force Microscopy (AFM) ist eine hochauflösende Rastersondenteknik zur Untersuchung der Oberflächentopographie von mechanischen Eigenschaften durch die Wechselwirkungen zwischen einer scharfen Sonde und der Probenoberfläche. Sie ermöglicht die nanoskalige Charakterisierung von Materialien unter unterschiedlichen Umweltbedingungen. Im unten abgebildeten Beispiel wurde die AFM auf aluminiumbasierte sowie goldbeschichtete Bipolarplatten angewendet, die in PEM-Elektrolysestapeln im Rahmen des Alu-Eli-Projekts eingesetzt wurden. Ziel war der Vergleich der lokalen elektrischen Leitfähigkeit im Mikromaßstab sowie der mittleren Oberflächenrauheit. Die Untersuchungen erfolgten mit einem Atomic-Force-Mikroskop vom Typ Bruker Multimode 8 in Kombination mit einem NanoScope-V-Controller. Zur Aufnahme von Höhen- und Kontaktstrombildern kamen der quantitative nanomechanische Tapping-Modus (PeakForce QNM™) sowie der Stromdetektionsmodus (PeakForce TUNA) zum Einsatz. Die Höhenbilder dienen der Berechnung der mittleren Oberflächenrauheit und der Charakterisierung der Oberflächenstruktur der Bipolarplatten. Die Kontaktstrombilder stellen die elektrisch leitfähigen Bereiche dar; detektiert wurden Ströme im Bereich von Femtoampere bis Nanoampere. Die mittlere Oberflächenrauheit der aluminiumbasierten Bipolarplatte betrug 484 nm, während die goldbeschichtete Variante eine Rauheit von 85,4 nm aufwies. Die deutlich reduzierte Rauheit belegt eine erfolgreiche Beschichtung. Sie wirkt sich auch positiv auf Gleichmäßigkeit, Kontaktierung sowie Stabilität aus, was Effizienz und Lebensdauer der Bipolarplatten verbessert. Strukturell erscheint die Goldoberfläche eher sphärisch, die Aluminiumoberfläche stärker geschichtet. In den Kontaktstrombildern zeigte die aluminiumbasierte Platte einen maximalen Strom von 791,2 fA, wohingegen die goldbeschichtete Bipolarplatte 8,5 nA erreichte. Dies bestätigt die signifikant höhere elektrische Leitfähigkeit der Goldbeschichtung gegenüber Aluminium.

CASE STUDY ON ATOMIC FORCE MICROSCOPY

Atomic force microscopy (AFM) is a high-resolution scanning probe technology that captures surface topography and mechanical properties by measuring the interactions between a sharp probe and the sample surface. It enables nano-scale mapping and characterisation of materials under different environmental conditions. The following example shows the use of atomic force microscopy with aluminium-based bipolar plates and gold-coated variants, which were used in proton exchange membrane (PEM) electrolysis stacks in the »Alu-Eli« project. The bipolar plates were compared with regard to their average surface roughness at microscale and their local electrical conductivity. In this analysis, the surface structure and local electrical conductivity were measured with a Bruker Multimode 8 atomic force microscope operated with a NanoScope V controller. The quantitative nanomechanical tapping mode (PeakForce QNM™) and the current detection mode (PeakForce TUNA) were used to produce topographical maps and contact current maps. The topographical maps supported calculation of average surface roughness and characterisation of the bipolar plates' surface structure. The contact current maps visualise electrically conductive areas of the plates at microscale, with conductivity detectable in the femtoampere to nanoampere range. The average surface roughness of the aluminium bipolar plate was calculated as 484 nm, while the gold coating had a roughness of just 85.4 nm. This demonstrates that the gold layer had been successfully applied and resulting in significantly reduced roughness. A less rough surface improves the evenness and stability of the coating as well as the electrical contact, which is a decisive factor in the efficiency and durability of bipolar plates. The surface structure of gold is relatively spherical, while the surface of aluminium is more layered. In the contact current images, the aluminium-based bipolar plate has a maximum current of 791.2 fA, while the gold-coating bipolar plate achieves 8.5 nA. This confirms that gold coating offers significantly higher electrical conductivity than aluminium.



a) Höhenbilder und Kontaktstrombilder der Aluminium-Bipolarplatte bei 50 µm ScanGröße sowie
c) Höhenbilder und Kontaktstrombilder der goldbeschichteten Bipolarplatte bei 25 µm Scan-Größe.
a) Topography and Contact current for the aluminium bipolar plate at a scan size of 50 µm.
c) Topography and Contact current for the gold-coated bipolar plate at a scan size of 25 µm.



Dr. Aygün Cali
ayguen.cali@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-255

RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE AM ZSW

Das ZSW verfügt über drei Rasterelektronenmikroskope (REM) und zwei Zwei-Strahl-Elektronenmikroskope (FIB-SEM), mit denen ein breites Spektrum an Materialien, Entwicklungsthemen und Kundenanfragen bearbeitet werden. Die verschiedenen Geräte werden in der nachfolgenden Tabelle kurz vorgestellt.

Model	SEM			FIB-SEM	
	JSM-IT500	Leo1530VP	GeminiSEM460	Crossbeam550	S9000G
Emitter	Tungsten hairpin cathode	Thermionic Schottky emitter			<ul style="list-style-type: none"> • Ga⁺ source • Thermionic Schottky emitter
Beam current*	1 pA to 1000 nA	8 pA to 3 nA	3 pA to 40 nA	3 pA to 40 nA	2 pA to 400 nA
Resolution 1kV(HV)*	15 nm	2.5 nm	1.1 nm	1.4 nm	1.4 nm
Best resolution*	3.0 nm (30 kV)	1.0 nm (20 kV)	0.7 nm (15 kV)	0.9 nm (15 kV)	0.7 nm (15 kV)
Main application	Post-mortem of battery materials	Battery materials		Photovoltaics/ thin films	Fuel cells
Special features	EDX	<ul style="list-style-type: none"> • EDX • Inert-transfer glovebox to SEM 	<ul style="list-style-type: none"> • EDX • Raman • EBSD • Inert-transfer glovebox to SEM 	<ul style="list-style-type: none"> • EDX • Cryo-stage • 3D tomography • STEM • EBIC 	<ul style="list-style-type: none"> • EDX • cTOF-SIMS • STEM • Cryo-option • 3D tomography

* Angaben laut Hersteller / According to the manufacturer

Die Rasterelektronenmikroskopie ist eine etablierte Methode zur Analyse µm- bis nanoskaliger Strukturen in einem breiten Anwendungsbereich. Die Methode wird zur Materialcharakterisierung (z. B. Partikelmorphologie von synthetisierten Batteriematerialien), Qualitätskontrolle, Entwicklung und Forschung (z. B. Bewertung von Schichtdicken) oder Schadensanalyse eingesetzt.

Durch die Kombination des REM mit ergänzenden Analyse-Systemen werden zusätzliche Informationen auf derselben Größenskala gewonnen. Besonders verbreitet ist die Kopplung mit der energiedispersiven Röntgenanalyse (EDS) zur Elementanalyse und semiquantitativen Zusammensetzung, z. B. für den Nachweis von Kontaminationen in Elektrodenbeschichtungen zur Ursachenklärung von Defekten. Ergänzend steht ToF-SIMS zur hochsensitiven Bestimmung der elementaren Zusammensetzung sowie die EBIC zur Analyse der lokalen Stromsammlung in Solarzellen zur Verfügung. Die Raman-Spektroskopie wird häufig komplementär zur EDS-Analyse zur chemischen und strukturellen Charakterisierung eingesetzt.



QR-Code scannen und die wissenschaftliche Veröffentlichung zu Co-freiem LMNO lesen
Scan the QR code to read the scientific paper on Co-free LMNO.

Florian Klein et al DOI:10.1039/d2ta05957f

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY AT THE ZSW

The ZSW has three scanning electron microscopes (SEMs) and two dual-beam focused ion beam-scanning electron microscopes (FIB-SEMs), which make it possible to examine a broad spectrum of materials, development topics and customer queries. The following table provides a brief overview of the various devices.

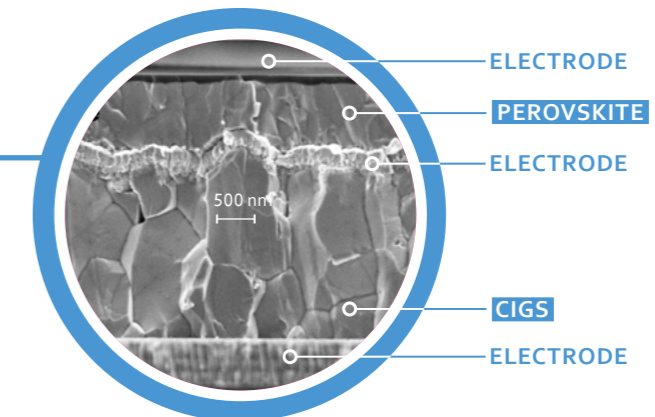
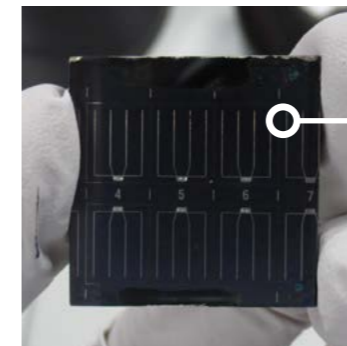
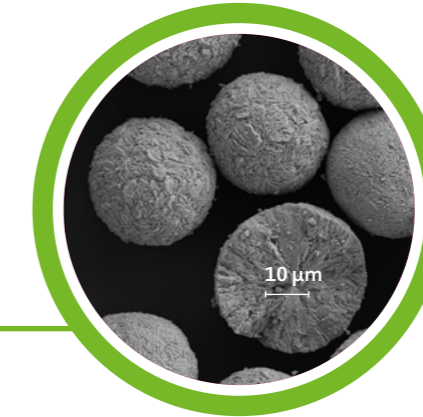
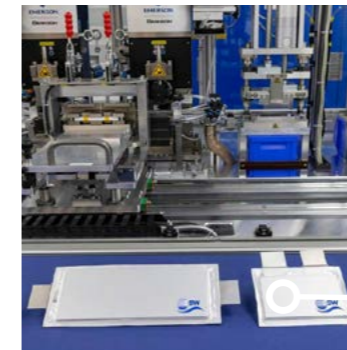
Scanning electron microscopy is an established method for analysing µm-scale to nanoscale structures in various applications. This method is used for material characterisation (e.g. particle morphology of synthesised battery materials), quality control, research and development (analysis of layer thickness) and damage analysis.

Combining SEM with supplementary analysis systems captures additional information on the same size scale. A particularly common accompaniment for SEM is energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) for elemental analysis and semi-quantitative compositional analysis, e.g. to detect contaminants in electrode coatings or cast light on the causes of defects. In addition, ToF-SIMS permits highly sensitive determination of elemental composition, while EBIC is available to analyse local charge collection in solar cells. Raman spectroscopy is often used to complement EDS analysis for chemical and structural characterisation.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Probenpräparation. Luft-sensitive Proben können unter Inertatmosphäre präpariert und transferiert sowie feuchte Proben kryogen untersucht werden. Mithilfe des fokussierten Ionenstrahls (FIB) lassen sich zudem hochlokalisierte Querschnitte zur gezielten Analyse z. B. von Defekten präparieren.

Another research focus is sample preparation. Air-sensitive samples can be transported in inert atmospheres, while moist samples can be analysed cryogenically. Focused ion beams (FIB) also make it possible to prepare highly localised cross-sections for targeted analysis, including for defects.

REM-ANALYSE FÜR BATTERIEN UND PHOTOVOLTAIK SEM ANALYSIS FOR BATTERIES AND PHOTOVOLTAICS



REM ist eine vielseitig einsetzbare Querschnittsmethodik zur Untersuchung von Batterien (oben) und auch Photovoltaik (unten).

SEM is a versatile cross-section analysis method used with batteries (top) and photovoltaics (bottom).



REM Stuttgart

Dr. Theresa Magorian Friedlmeier
theresa.friedlmeier@zsw-bw.de
+49 (0)711 7870-293

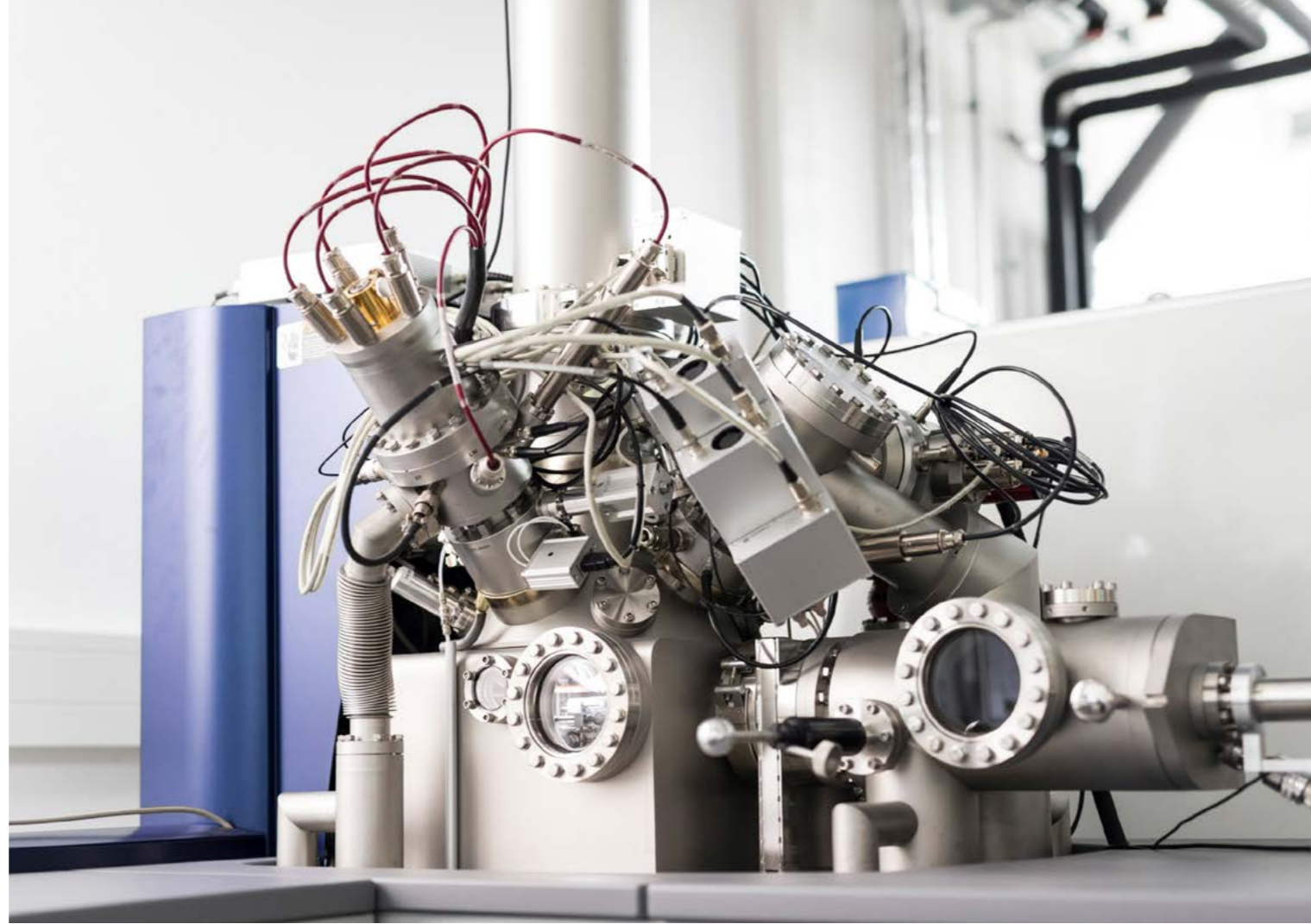
REM Ulm

Dipl.-Min. Claudia Pfeifer
claudia.pfeifer@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-214

Ildiko Lüdeking
ildiko.luedeking@zsw-bw.de
+49 (0)731 9530-823

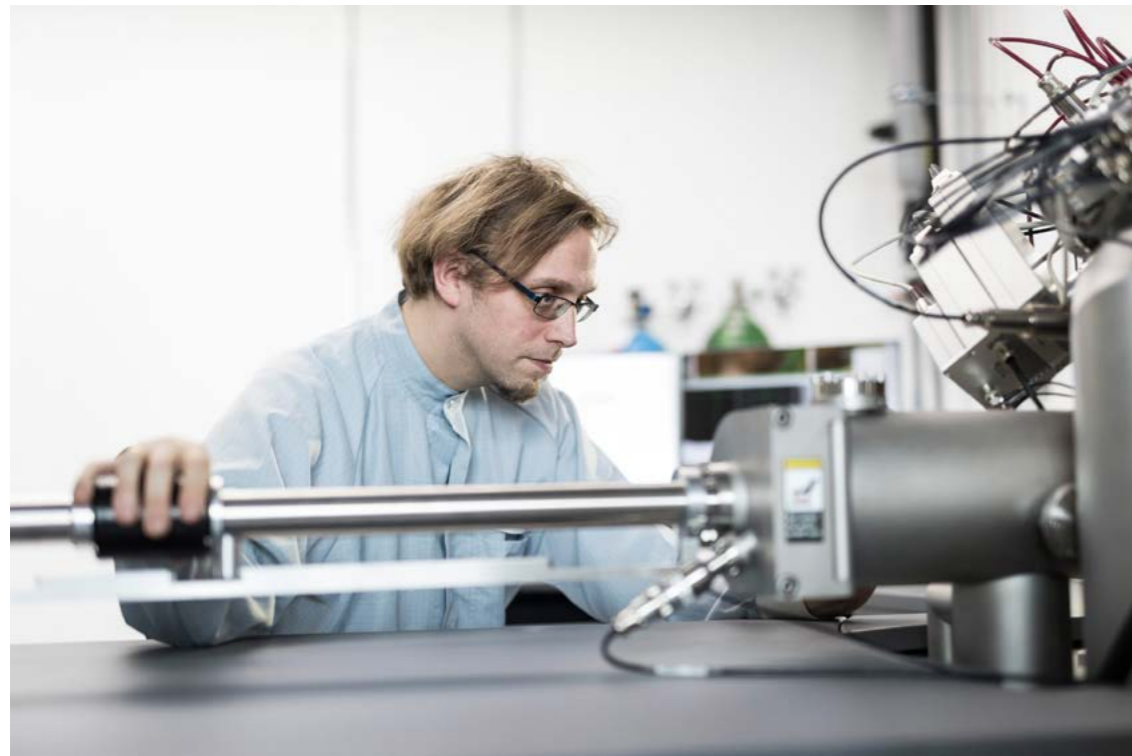
SCHICHTDICKENMESSUNG AUF RAUEM ALUMINIUM MIT TOF-SIMS

Die Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (ToF-SIMS) liefert die laterale Verteilung der Elemente und Moleküle einer Schicht in Form eines Tiefenprofils. Durch den Abtrag von Material kann mithilfe bekannter Sputterraten die Tiefe des jeweiligen Messpunktes bestimmt werden. Somit lässt sich über den Wechsel der Zusammensetzung die jeweilige Dicke der Schicht ermitteln. Aufgrund des größeren Aufwands einer Messung eignen sich andere Techniken besser für die meisten Anwendungen zur Schichtdickenbestimmung als das ToF-SIMS-Verfahren, wie ein Profilometer oder REM. Diese kommen jedoch an ihre Grenzen, wenn die Dicke dünner Schichten auf rauen Oberflächen untersucht wird. Ein Beispiel hierfür ist Aluminiumblech, das für die Schweißbarkeit mit einer TiZr-Schicht als Puffer versehen wird. Diese Funktionsschicht ist nur einige Nanometer dick. Zusammen mit der nativen, in etwa gleich dicken Aluminiumoxidschicht entscheidet sie über die Qualität des gesetzten Schweißpunktes. Auch für das ToF-SIMS ist die Messung der TiZr und Al_2O_3 -Schichtdicke herausfordernd. Jedoch ist es dem ZSW gelungen, diese in Übereinstimmung mit TEM-Aufnahmen zu ermitteln.



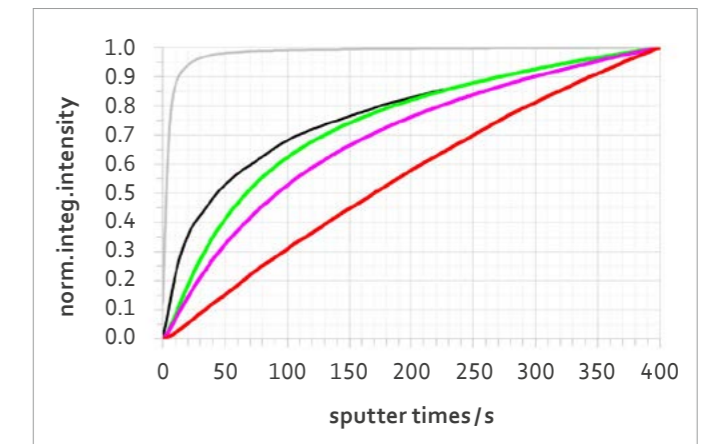
THICKNESS MEASUREMENT ON ROUGH ALUMINIUM WITH TOF-SIMS

Time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS) determines the lateral distribution of elements and molecules in a given layer, including in the form of a depth profile. Removing material makes it possible to use known sputter rates to determine the depth of a given measurement point. The change in composition can then be used to determine the thickness of the layer. Due to the considerable workload involved in the ToF-SIMS method, in most cases, other techniques are more suitable for thickness measurements – such as a profilometer or SEM. However, these alternatives reach their limits when examining the thickness of thin layers on rough surfaces. A prime example is an aluminium sheet to which a TiZr coating has been applied as a buffer for better weldability. This functional layer is just a few nanometres thick. Together with the native aluminium oxide layer of roughly the same thickness, it determines the quality of the weld spot. Measuring the thickness of TiZr and Al_2O_3 layers is still challenging with ToF-SIMS. However, the ZSW has succeeded in determining their thicknesses in conformity with SEM images.



Schichtdickenbestimmung durch Signalintegration, Vergleich bei 25% Gesamtsignal.

Thickness calculation from integrated signal. Difference between points at 25% of complete signal.

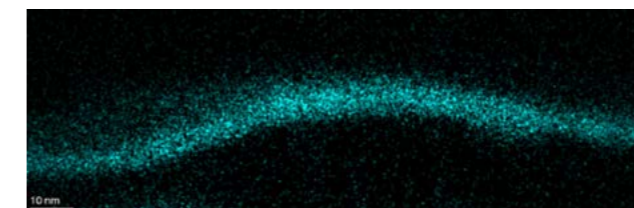
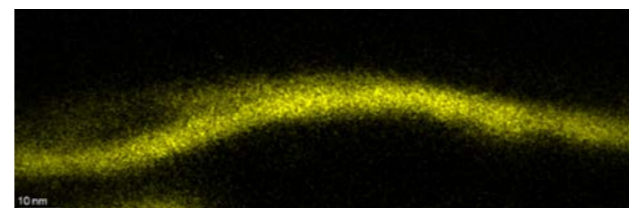
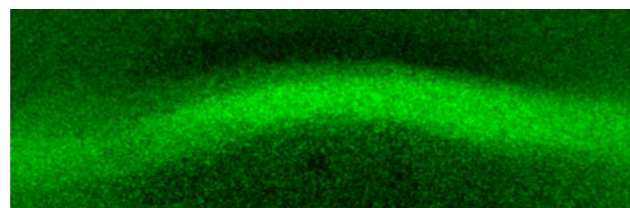


Ergänzende Informationen über unsere Analytikdienstleistungen finden Sie hier:

Learn more about our characterisation services at the ZSW here:



Dr. Wolfram Hempel
wolfram.hempel@zsw-bw.de
+49 (0)711 7870-264



Schichtdicke aus TEM-EDX:	Layer thickness from TEM-EDX:
ZrTiOx 5nm	ZrTiOx 5 nm
AlOx ≥4nm	AlOx ≥4 nm

MATERIALKOMPETENZ FÜR INDUSTRIELLE INNOVATIONEN IN KOOPERATION MIT DEM ZSW

Die gezeigten Beispiele belegen eindrücklich, dass die Materialanalyse für den Erfolg der industriellen Markteinführung neuer Technologien unabdingbar ist. Sie begleitet den gesamten Prozess von der grundlegenden Auswahl der Materialien und Prozesse über die Entwicklungs- und Skalierungsphase bis hin zum Produktrecycling. Ohne das grundlegende Verständnis der ablaufenden chemisch-physikalischen Prozesse sind eine Weiterentwicklung, Skalierung und industrielle Einführung nicht denkbar. Weitere Einsatzgebiete der Analytik sind die interne Qualitätskontrolle und der Qualitätsnachweis gegenüber dem (End-)Kunden.

Das ZSW bietet hierzu eine anspruchsvolle und auf konkrete Fragestellungen spezialisierte Analytik, kombiniert mit dem dazugehörigen breiten Hintergrundwissen und jahrelanger Erfahrung entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Nicht zuletzt erfordert die Einführung neuer Produkte im industriellen Maßstab häufig die Entwicklung von Normen, in welchen u. a. Verfahren oder Kriterien zur Qualitätskontrolle des fertigen Produkts festgelegt werden. In diese Normen fließen auch maßgebliche Kriterien ein, die erst anhand von Materialanalysen formuliert werden können. Hier arbeitet das ZSW in nationalen und internationalen Normengremien mit und liefert eine belastbare Datengrundlage für deren Ausgestaltung.

Die Umsetzung der in gemeinsamen Forschungsprojekten erarbeiteten wissenschaftlichen Ergebnisse in die industrielle Praxis ist wesentlicher Teil unseres Stiftungszweckes. Darüber hinaus steht das ZSW der Industrie auch in direkter Kooperation als zuverlässiger und unabhängiger Servicedienstleister und Entwicklungspartner zur Verfügung.



In der vertrauensvollen Zusammenarbeit mit Industriepartnern unterstützen wir mit geeigneter Analytik und KI-Modellen die Erreichung von wichtigen Meilensteinen.

In our trusting collaborations with industry partners, we deploy suitable analytics tools and AI models to support attainment of key milestones.



MATERIALS EXPERTISE FOR INDUSTRIAL INNOVATION IN COLLABORATION WITH THE ZSW

The examples shown here serve as emphatic proof that material analytics is essential for the successful industrial roll-out of new technologies. Materials analyses accompany the entire process, from the fundamental choice of materials and processes to the development and scaling phase and through to product recycling. Development, scaling and industrial roll-out are inconceivable without a fundamental understanding of the chemical and physical processes at work. Analytical measurements also play an important role in internal quality controls and demonstrating quality to (end) customers.

The ZSW offers sophisticated analysis services with specialism in specific issues, combined with extensive background knowledge and years of expertise spanning the entire value chain. If nothing else, introducing novel products at industrial scale often calls for changes to the corresponding standards, which define issues including quality control procedures and criteria for the finished product. These standards also incorporate key criteria that can only be formulated on the basis of material analyses. In this context, the ZSW contributes to national and international standardisation bodies and provides a robust data basis for drafting standards.

Implementing the scientific findings of joint research projects in industrial practice is an important part of our purpose as a foundation. Furthermore, the ZSW is available to support industry, including in direct collaboration, as a reliable and independent service provider and development partner.

ERFAHRUNG UND KOMPETENZ ENTLANG DER GESAMTEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE

Das Bindeglied zwischen dem extensiven Gerätepark am ZSW und den hochkarätigen Forschungsthemen sind die Mitarbeitenden und deren Expertise. Spezialkenntnisse zu Materialien, deren Eigenschaften und den jeweiligen Produkten fließen in die Auswahl der Charakterisierungsmethoden und in die Bewertung der Ergebnisse ein. Mitarbeitende am ZSW entwickeln ihre Spezialkenntnisse kontinuierlich weiter und lernen die nächste Wissenschaftlergeneration in die neuesten Entwicklungen ein. Diese Kombination aus hoher Flexibilität und Expertise ist nur an einem Forschungsinstitut möglich. Daher ist es eine große Herausforderung, ständig bei den neuesten Entwicklungen dabei zu bleiben, um diese für unsere Partner in Industrie und Forschung bereitzustellen bzw. evaluieren zu können.

Besonders wertvoll ist die sorgfältig ausgewählte Sensorik in Kombination mit KI-Algorithmen, um mit unseren industrienahen Produktionslinien sowohl das Potenzial der KI in der Produktion aufzuzeigen als auch Optimierungen voranzutreiben. Dafür sind eine intensive Charakterisierung und Definition des Zielsystems sehr wertvoll, beispielsweise um einen wissenschaftlich fundierten Digital Twin zu generieren. In der vertrauensvollen Zusammenarbeit mit Industriepartnern unterstützen wir mit geeigneter Analytik und KI-Modellen die Erreichung von wichtigen Meilensteinen.

EXPERIENCE AND EXPERTISE THROUGHOUT THE VALUE CHAIN

Our staff and their expertise are the connecting link between the ZSW's extensive portfolio of machinery and its first-rate research topics. Specialist knowledge of materials, their properties and the respective products flow into the selection of characterisation methods and the evaluation of results. Staff members at the ZSW continuously further their specialist knowledge and help to train the next generation of scientists in the latest developments. This combination of high flexibility and expertise is only possible at a research institute. A major challenge in this context is, therefore, constantly keeping pace with the latest developments in order to evaluate them and make them available to our industry and research partners.

The combination of meticulously selected sensor systems and AI algorithms proves particularly valuable, as our industry-oriented production lines enable us to demonstrate the potential of AI in production settings and as a means of driving optimisation. Intensive characterisation and definition of the target system are very useful, such as to generate a scientifically substantiated digital twin. In our trusting collaborations with industry partners, we deploy suitable analytics tools and AI models to support attainment of key milestones.



AUSBLICK UND FAZIT

Für Deutschland und Europa gewinnt Materialanalytik künftig noch stärker an strategischer Bedeutung: Sie fördert nicht nur die Entwicklung neuer Energietechnologien, sondern steigert auch Qualität, Sicherheit und Langlebigkeit von Hightechprodukten in Mobilität, Elektronik und Medizintechnik. Der Fokus liegt auf resilienten Lieferketten, der Substitution kritischer Rohstoffe, geschlossenen Stoffkreisläufen sowie der schnelleren Industrialisierung neuer Energietechnologien. KI-gestützte Analytik, vernetzte Forschungsinfrastrukturen und europäische Kooperationen werden entscheidend sein, um technologische Souveränität, Ressourceneffizienz und Wettbewerbsfähigkeit zu sichern.

SUMMARY AND OUTLOOK

For Germany and Europe, the strategic importance of materials analysis is set to increase further in future. Besides promoting the development of new energy technologies, materials analysis also consolidates the quality, safety and durability of high-tech products in the transport, electronics and medical technology sectors. It focuses on replacing critical raw materials, establishing closed material loops and building resilient supply chains. AI-assisted analytics, networked research infrastructures and European collaborations will be decisive in ensuring technological sovereignty, resource efficiency and competitiveness.

FACHGEBIETE & FORSCHUNGS- PROJEKTE

DEPARTMENTS &
RESEARCH PROJECTS



Systemanalyse (SYS)

Systems Analysis (SYS)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Den Übergang zu einem klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystem aktiv so zu unterstützen, dass der Industriestandort Baden-Württemberg nachhaltig gestärkt wird, ist zentrale Aufgabe des Fachgebiets SYS.

Das Team Windenergie setzt direkt bei der Technologie an: Im Fokus steht die Entwicklung und Erprobung technischer Lösungen für eine effiziente Nutzung der Ressource Wind in bergigem Gelände, z. B. durch neue Reglerkonzepte, den Einsatz von Sensorik und die Anpassung von Komponenten. Gleichzeitig geht es auch um naturschutzfachliche Fragen. Mit Hilfe einer intensiven Begleitforschung soll das Spannungsfeld zwischen Windenergienutzung und Artenschutz minimiert werden.

Daten sind die Basis für das Team Simulation und Optimierung. Mithilfe von Verfahren des Maschinellen Lernens werden diese gezielt genutzt, um Energie- und Ressourcenbedarfe zu reduzieren, Prozesse zu optimieren oder ganz neue Produkte, wie ein Antikollisionssystem für windenergiegefährdete Vogelarten, zu entwickeln. Diese Kompetenz zusammen mit dem Technologie-Know how anderer Fachgebiete des ZSW eröffnet völlig neue Möglichkeiten hinsichtlich des Dienstleistungsspektrums.

An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft bewertet die strategische Systemanalyse Marktchancen parallel zur Technologieentwicklung und analysiert internationale Wettbewerbspositionen sowie Wertschöpfungspotenziale. Mit der Entwicklung von Markteinführungsinstrumenten für grünen Wasserstoff, grünen Kohlenstoff oder synthetische Kraftstoffe sowie Energie- und Klimaschutzszenarien unterstützt das Fachgebiet auch die Politik.



Antikollisionssystem
»BirdRecorder«
»BirdRecorder«
collision avoidance
system



Dipl.-Wirt.-Ing. Maïke Schmidt
Head of Department
maïke.schmidt@zsw-bw.de
+49 711 7870-232



»Carbon Management ist nicht nur ein wichtiger Baustein für den Klimaschutz beim Umgang mit unvermeidbaren Emissionen, sondern sichert über eine konsequente Nutzung und Kreislaufführung der Ressource Kohlenstoff deren dauerhafte Verfügbarkeit auch in einer postfossilen Welt.«

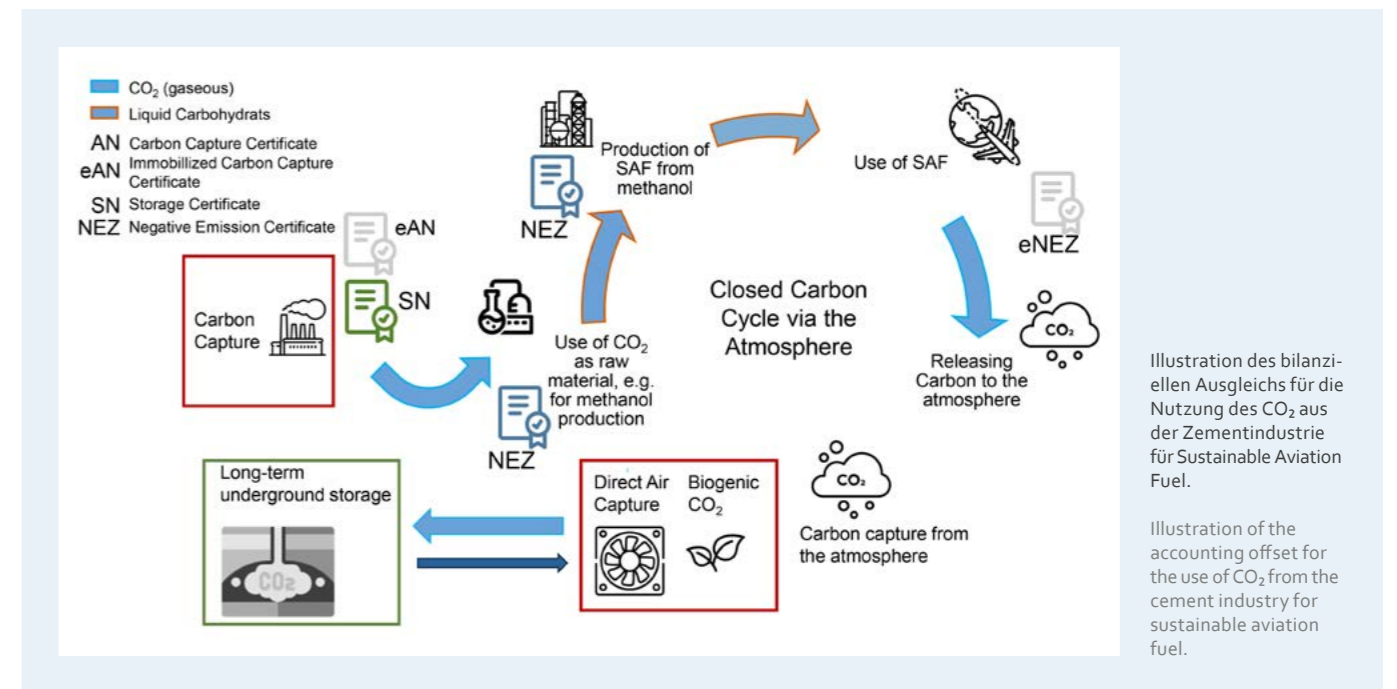
»Carbon management is an important element of climate protection when managing unavoidable emissions. However, by promoting the systematic use and closed-loop circulation of carbon, it also ensures the continued availability of this resource, even in a post-fossil world.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The main brief of the SYS department is to actively support the transition to a climate-neutral energy and economic system while strengthening Baden-Württemberg's long-term position as an industrial location.

The Wind Energy team engages directly with technology, focusing on the development and testing of technical solutions that target efficient use of wind energy in mountainous terrain, including through new control concepts, use of sensors and adaptation of components. At the same time, the team examines issues of natural conservation. They conduct intensive accompanying research in an effort to minimise tensions between wind energy use and species conservation.

Data represents the starting point for the Simulation and Optimisation team. Machine learning methods can be used to cut energy consumption, reduce resource requirements, optimise processes and develop entirely new products, such as anti-collision systems for bird species endangered by wind turbines. This knowledge dovetails perfectly with the technological expertise in other departments and opens the door for the ZSW to introduce entirely new services. Strategic systems analysis works at the interface between science and business, evaluating market opportunities in parallel with technology development, assessing international competitive positions and analysing potential for added value. In developing market launch tools for green hydrogen, green carbon and synthetic fuels, the SYS department actively supports political stakeholders.



EUROPAWEITES SYSTEM ZUM CO₂-AUSGLEICH UNVERMEIDBARER EMISSIONEN FÜR DIE PRODUKTION VON SUSTAINABLE AVIATION FUEL

Für Prozesse mit unvermeidbaren Treibhausgasemissionen, z. B. in der Zementindustrie, verlangt das EU-Emissionshandelsystem ab 2039 eine treibhausgasneutrale Produktion. Dies ist für die betroffenen Industriezweige nur über die Abscheidung von CO₂ erreichbar. Das CO₂ kann entweder über eine geeignete Infrastruktur zu einem geologischen Speicher transportiert und dauerhaft gespeichert werden oder als Kohlenstoffquelle für die Herstellung synthetischer Basischemikalien wie Methanol und dessen Folgeprodukte wie Kunststoffe dienen. Die Errichtung einer CO₂-Transportinfrastruktur in Deutschland bis 2038 erscheint kaum zu schaffen, eine Nutzung von unvermeidbaren Emissionen für die Herstellung sog. Renewable Fuels of Non-Biological Origin ist nach dem geltenden Rechtsrahmen aber nur bis zum Jahr 2040 zulässig. Unternehmen benötigen deshalb bereits heute Investitionssicherheit, um in Abscheidetechnologien und damit in die Zukunft des Standorts Baden-Württemberg zu investieren.

Das Fachgebiet SYS entwickelte daher im Auftrag der Firma Schwenk Zement, kofinanziert durch das Verkehrsministerium des Landes Baden-Württemberg, ein Bilanzierungssystem für CO₂, das die Nutzung von unvermeidbarem CO₂ und Treibhausgasneutralität vereinbar macht (siehe Abbildung): über die Verknüpfung der Abscheidung und Nutzung von unvermeidbarem CO₂ mit der Abscheidung und geologischen Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre (DACs) oder aus Biomasse (BECCs) – also mit technischen Verfahren zur Generation von negativen Emissionen.

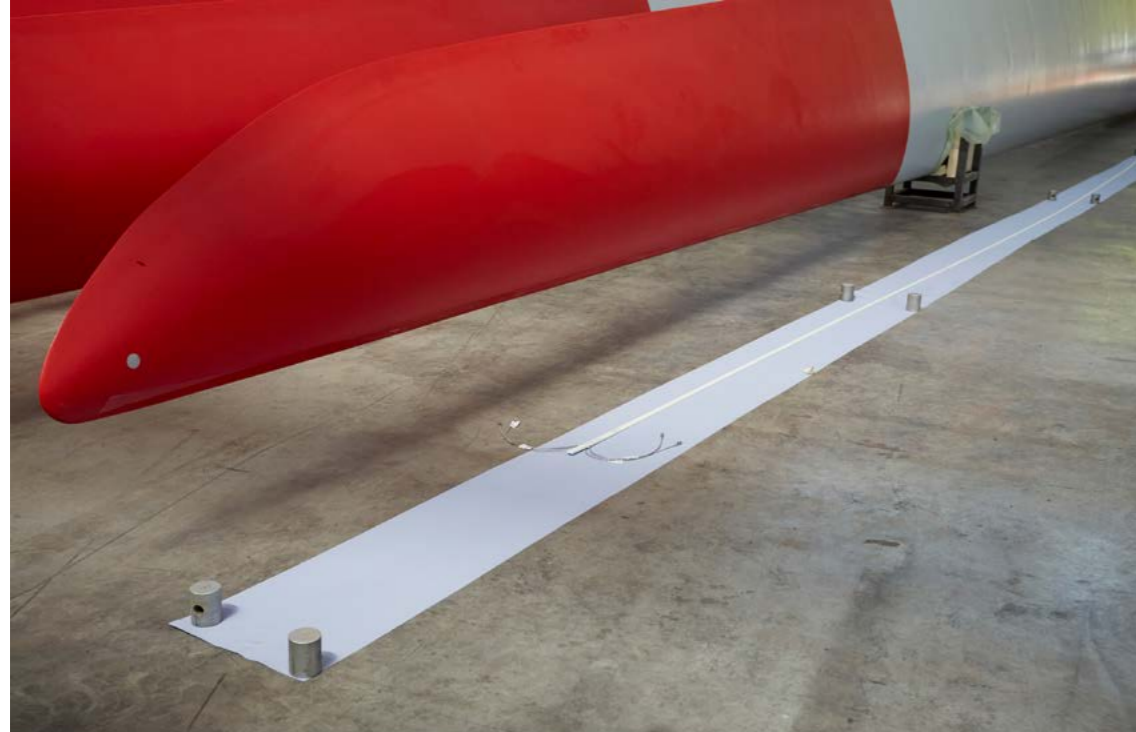
EUROPE-WIDE CARBON OFFSETTING SYSTEM TO USE UNAVOIDABLE EMISSIONS IN SUSTAINABLE AVIATION FUEL PRODUCTION

The EU Emissions Trading System requires that processes with unavoidable greenhouse gas (GHG) emissions, such as in the cement industry, pivot to GHG-neutral production from 2039. For the sectors concerned, carbon capture technologies represent the only means of achieving this. The captured carbon can either be transported via suitable infrastructure to a geological storage site and permanently sequestered or used as a carbon source for the production of synthetic basic chemicals, such as methanol, and their derivatives, such as plastics. The prospect of CO₂ transport infrastructure being established in Germany by 2038 appears unlikely to be achieved and, under the current legal framework, the use of unavoidable emissions for the production of renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) will only be permitted until 2040. Yet, even today, companies need investment security if they are to invest in carbon capture technologies and, therefore, in the future of Baden-Württemberg as an industrial location.

SYS is therefore developing – on behalf of Schwenk Zement, in a project co-financed by the Baden-Württemberg Ministry of Transport – a CO₂ accounting system that reconciles the use of unavoidable CO₂ emissions with GHG neutrality (see figure). It links the capture and use of unavoidable CO₂ emissions with the capture and storage of CO₂ from the atmosphere (DACs) or from biomass (BECCs) – that is, with technical methods from the negative-emission generation.



Dipl.-Wirt.-Ing. Maïke Schmidt
maïke.schmidt@zsw-bw.de
+49 711 7870-232



Faseroptischer Biege-sensor vor dem Einbau in eines der Rotorblätter.

Fibre-optic bend sensors prior to installation in one of the rotor blades.

ERPROBUNG EINER INDIVIDUELLEN BLATTWINKELVERSTELLUNG AN EINER WINDENERGIEANLAGE

Um die Stromgestehungskosten weiter zu reduzieren, verfügen moderne Windenergieanlagen über immer größere Rotordurchmesser. Das führt dazu, dass längere Rotorblätter während einer Umdrehung beispielsweise durch ausgeprägte vertikale Windprofile einer erheblichen Variation der Wind- und Anströmbedingungen ausgesetzt sind. Dies spiegelt sich in der mechanischen Belastung der Bauteile wider. Gegenüber der klassischen synchronen Verstellung der Blattwinkel aller drei Rotorblätter bietet die individuelle Blattwinkelverstellung (IPC) die Möglichkeit, jedes einzelne Blatt der Windenergieanlage stets optimal den Bedingungen anzupassen. Im Verbundprojekt FLAMINGO des Bundeswirtschaftsministeriums wurden gemeinsam mit Forschungspartnern optimierte Strategien zur Einzelblattregelung entwickelt und am Forschungstestfeld WINSSENT des ZSW im Feldversuch erprobt.

Dazu wurde bereits während des Baus der Windenergieanlagen eine faseroptische Instrumentierung in die Rotorblätter eingebracht (siehe Abbildung), mit deren Hilfe verschiedenste strukturelle Verformungen und Belastungen während des Betriebs erfasst werden. Der entwickelte IPC-Regler wurde vorab im Hardware-in-the-Loop-Teststand am ZSW ausgiebig getestet, bevor er auf die Steuerung einer Forschungsanlage transferiert wurde. In den Feldversuchen konnte im Vergleich der beiden Anlagen eine Reduktion der mechanischen Belastungen der Rotorblätter nachgewiesen werden.

TESTING OF INDIVIDUAL ANGLE ADJUSTMENT OF WIND TURBINE BLADES

In an effort to further reduce electricity production costs, modern wind turbines feature rotors with increasingly large diameters. These longer rotor blades are subject to increasingly variable wind and airflow conditions as they rotate, including due to pronounced vertical wind profiles. This is also reflected in the mechanical stresses on components. Unlike the conventional system in which the pitch angle is synchronously adjusted for all three rotor blades, individual pitch control (IPC) makes it possible to continuously adjust the pitch angle of each turbine blade in line with conditions. In FLAMINGO – a joint project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWE) – optimised individual blade control strategies were developed with research partners and trialled at the ZSW's WINSSENT test site.

Fibre-optic instrumentation installed in the rotor blades during the turbines' construction made it possible to detect various structural deformations and stresses during operation. The IPC system developed in the project underwent extensive testing on a ZSW hardware-in-the-loop test bench before being deployed at the test site. In field trials, a comparison of the two turbines showed that the IPC system reduces mechanical stresses on the rotor blades.

ENTWICKLUNG EINES OPTIMIERTEN MODELLS ZUR BESTIMMUNG DES NAHEN NACHLAUFS VON WINDENERGIEANLAGEN

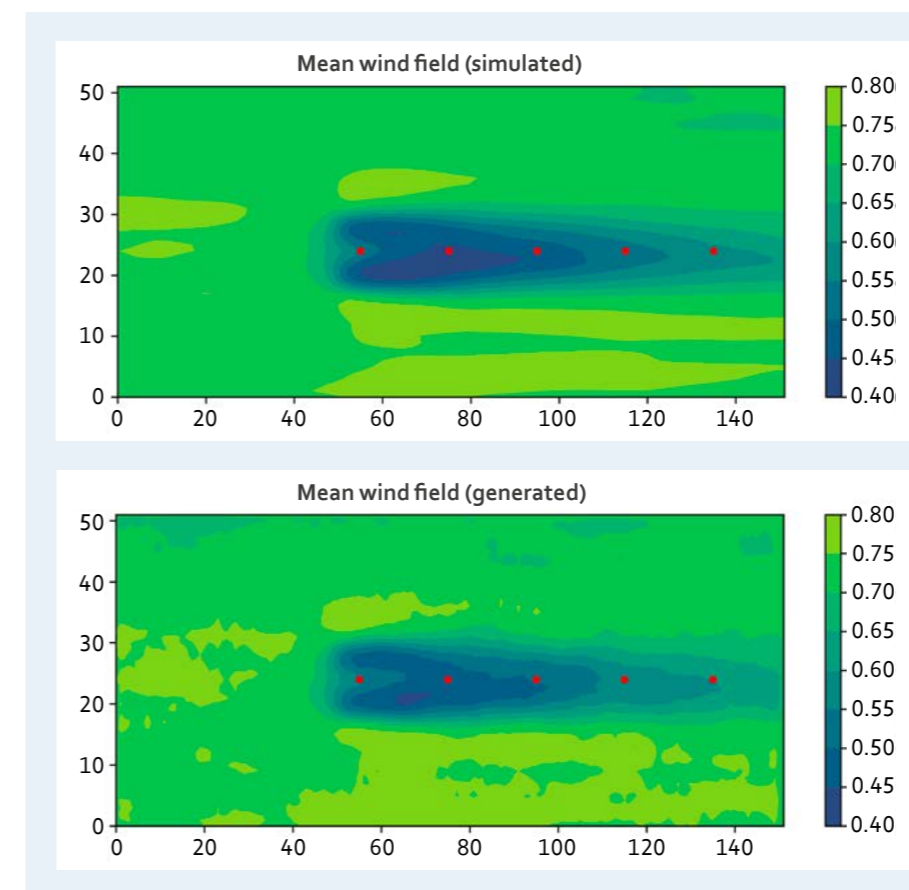
Der beschleunigte Ausbau der Windenergie in Deutschland ist entscheidend für das Erreichen der Klimaziele und die Sicherung der Energieversorgung. Da weitere geeignete Flächen für die Onshore-Windenergienutzung begrenzt sind, kommt einer möglichst effizienten Nutzung bestehender Standorte eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere das Repowering alter Windparks bietet großes Potenzial, den Flächenertrag durch leistungsstärkere Anlagen und höhere Türme deutlich zu steigern. Eine dichtere Anordnung der Windenergieanlagen führt jedoch zu Unsicherheiten hinsichtlich der Belastungen durch den nahen Strömungsnachlauf benachbarter Anlagen. Gängige Modelle sind auf größere Abstände ausgelegt und erfordern daher hohe Sicherheitsfaktoren, was zu Überdimensionierung und ungenutztem Flächenpotenzial führt.

Das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt NearWake adressiert diese Herausforderung, indem der nahe Nachlauf besser verstanden und Modelle zur Last- und Lebensdauerabschätzung gezielt verbessert werden. Ein im Team SimOpt entwickeltes KI-basiertes Turbulenzmodell nutzt Verfahren des maschinellen Lernens, um Nachlaufcharakteristika aus hochaufgelösten Simulationen abzuleiten (siehe Abbildung unten). Dadurch können Lastberechnungen künftig deutlich schneller und kostengünstiger erfolgen, da auf aufwendige numerische Simulationen weitgehend verzichtet werden kann. Dies schafft die Grundlage für eine effizientere Flächennutzung und einen beschleunigten Ausbau der Windenergie.

DEVELOPMENT OF AN OPTIMISED MODEL TO DETERMINE NEAR WAKES OF WIND TURBINES

Accelerated expansion of wind-based generation capacity in Germany will be decisive if the country is to achieve its climate goals and secure its energy supplies. Suitable sites for onshore wind power generation are limited, so it vital that existing sites are used as efficiently as possible. In particular, the repowering of older wind farms offers considerable potential to markedly increase power output per unit area by deploying more powerful turbines with taller towers. However, denser positioning of wind turbines raises uncertainty regarding the impacts caused by the near wakes of neighbouring turbines. Common models are designed to be erected with greater clearances and therefore require high safety margins, which leads to oversizing and unused space potential.

The NearWake project tackles this challenge by improving understanding of near wakes and driving targeted improvements of stress and lifespan estimation models. An AI-based turbulence model developed in the SimOpt working group uses machine learning processes to derive near wake characteristics from high-resolution simulations. In the future, this will enable markedly faster and more cost-efficient load calculations by making it possible to broadly dispense with complex numerical simulations. It therefore lays the foundations for more efficient use of space and accelerated build-out of wind power capacity.



Ein simulierter Nachlauf (oben) von Windenergieanlagen im Vergleich zu einem KI-generierten Nachlauf (gemittelt, unten), der eine deutlich geringere Abnahme der Windgeschwindigkeit im direkten Nachlauf zeigt.

A simulated wake (above) from wind turbines compared to an AI-generated wake (averaged, below), which shows a significantly smaller drop in wind speed in the direct wake.



Florian Haizmann
florian.haizmann@zsw-bw.de
+49 711 7870-334



Ph. D. Daniel Leukauf
daniel.leukauf@zsw-bw.de
+49 711 7870-203

Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das Fachgebiet Photovoltaik Materialforschung (MAT) hat über 35 Jahre Erfahrung in der Entwicklung und Herstellung von großflächigen Dünnschichtmodulen. Dünnschicht-Photovoltaik bietet gleich mehrere ökologische und ökonomische Vorteile: Durch den geringen Materialeinsatz werden wertvolle Ressourcen geschont, die Herstellung der Module ist energieeffizienter als bei klassischen Silizium-Solarzellen und somit ist der CO₂-Fußabdruck kleiner.

Der Bereich MAT arbeitet an stabilen Materialien und Herstellungsprozessen der nächsten Generation von Solarzellen. Aus Materialklassen wie Perowskiten und Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS) entwickelt das Fachgebiet MAT Zellen, die besonders effizient und vielseitig einsetzbar sind. Dabei wird auf kostengünstige und skalierbare Herstellungsverfahren wie (Co-)Verdampfen und Schlitzgießen gesetzt, die den Weg von der Forschung zur industriellen Produktion ebnen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf Tandemsolarzellen, die durch die Kombination verschiedener Materialien deutlich höhere Wirkungsgrade erreichen und damit mehr Strom aus derselben Fläche liefern. Um sicherzustellen, dass diese Technologien auch langfristig zuverlässig funktionieren, führt das Fachgebiet MAT umfassende Alterungstests durch und nutzt modernste Analytikmethoden wie Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (ToF-SIMS) und Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscopy (FIB-SEM). Diese Arbeit trägt dazu bei, Solarenergie noch effizienter, günstiger, nachhaltiger und langlebiger zu machen – ein wichtiger Schritt für die Energiewende und den Klimaschutz.



Dr. Eva-Maria Hammer
Head of Department
eva-maria.hammer@zsw-bw.de
+49 711 7870-436



»Mit der Übernahme der Fachgebietsleitung setze ich auf die Dünnschicht-Solarzellen als Schlüsselinnovation – ein Hoffnungsträger, der Europas Industrie neue Wettbewerbschancen und nachhaltiges Wachstum eröffnet.«

»As the new Head of Department, I'm focused on thin-film solar cells as a key innovation – a beacon of hope that opens the door to new competitive opportunities and sustainable growth for European industry.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The Photovoltaics Materials Research (MAT) department has over 35 years' experience in the development and production of large-scale thin-film modules. Thin-film photovoltaics offer numerous environmental and economic advantages: while lower material consumption conserves precious resources, the modules can also be produced in a more energy-efficient manner than conventional silicon solar cells, thus shrinking their carbon footprint.

Our researchers work with stable materials and manufacturing processes for the next generation of solar cells. Drawing on materials such as perovskites and copper-indium-gallium-selenide (CIGS), the MAT department is developing highly efficient and versatile cells. We rely on cost-efficient, scalable manufacturing processes, such as thermal (co-)evaporation and slot-die casting, which pave the way for research into industrial production. Another focus is tandem solar cells, which combine different materials to achieve significantly higher efficiency levels and thus generate more power from the same unit area. In order to ensure that these technologies offer long-term functional reliability, the MAT department conducts ageing tests and uses state-of-the-art analytics methods, such as time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS) and focused ion beam-scanning electron microscopy (FIB-SEM). This work is helping to make solar power more efficient, more affordable, more sustainable and more durable – and represents an important step forward for the energy transition and climate protection.

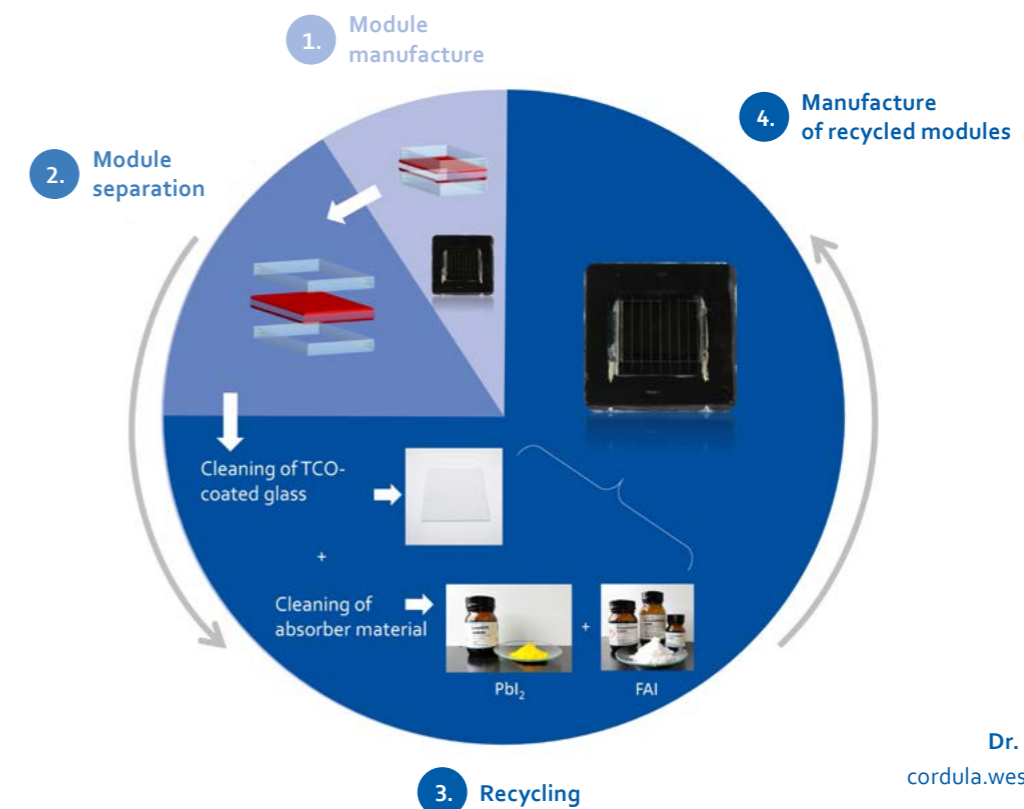
RECYCLING: WICHTIGER BAUSTEIN FÜR EINE NACHHALTIGE SOLARZELLENPRODUKTION

Mit dem wachsenden Fokus auf Nachhaltigkeit rückt auch das Berücksichtigen von Recyclingoptionen neuer Solartechnologien in den Vordergrund. Weil Perowskit- und Perowskit-Silizium-Tandemmodule bereits auf dem Markt sind, ist es an der Zeit, über deren Recycling nachzudenken. Einerseits enthalten Perowskit- und Perowskit-Silizium-Tandemmodule kritische Materialien wie Indium in den transparenten Kontaktschichten oder Cäsium in der Perowskit-Absorber-Schicht. Andererseits besteht etwa ein Drittel des Molekulargewichts des Perowskit-Absorbers aus Blei, weshalb die Deponierung von Perowskit-Modulen strikt zu vermeiden ist, um ein Austreten von Blei in die Umwelt und in die Nahrungskette zu verhindern. Da es bis jetzt noch kein industrielles Recyclingverfahren für Perowskit-Module gibt, war das Ziel des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten PeroCycle-Projekts, ein solches zu entwickeln. Zusammen mit der Solar Materials GmbH als Industriepartner und der Solaveni GmbH als assoziiertem Partner konnten vom ZSW hergestellte und verkapselte Perowskit-Minimodule mittels eines thermochemischen Verfahrens aufgetrennt, die Gläser mit dem transparenten Frontkontakt gereinigt und wiederverwendet werden und mehr als 96 % des Blei-Iodids aus dem Perowskit-Absorbermaterial in sehr hoher Reinheit (>99.96 %) zurückgewonnen und für die Herstellung von neuen Perowskit-Modulen wiederverwendet werden (siehe Abbildung).

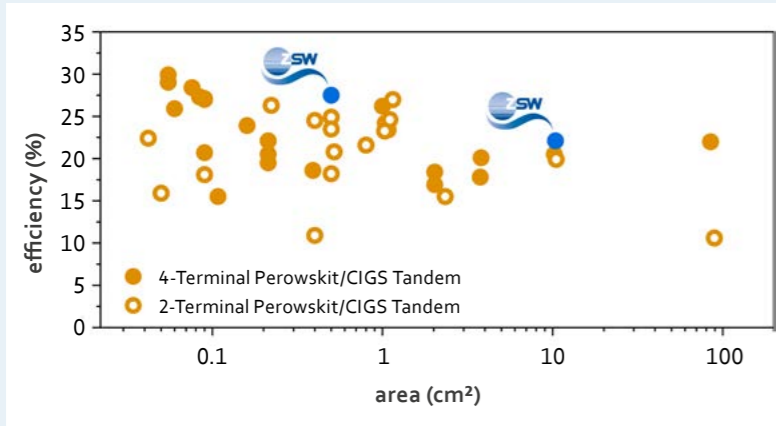
RECYCLING: A VITAL BUILDING BLOCK FOR SUSTAINABLE SOLAR CELL PRODUCTION

As the focus on sustainability grows, the issue of new solar technologies' recycling is increasingly taking centre stage. Given that perovskite and perovskite-silicon tandem modules are already on the market, thought must now be given to their recycling. On the one hand, perovskite and perovskite-silicon tandem modules contain critical materials, such as indium in the transparent contact layers and caesium in the perovskite absorber layer. On the other hand, lead accounts for around one-third of the molecular weight of the perovskite absorber, hence the strict restrictions on landfill disposal of perovskite modules to prevent lead from escaping into the environment and into food chains. At present, no industrial-scale recycling process exists for perovskite modules – so the PeroCycle project funded by the German Federal Environment Foundation (DBU) sought to develop one. In conjunction with industry partner Solar Materials GmbH and associate partner Solaveni GmbH, perovskite modules manufactured and encapsulated by the ZSW were broken down in a thermochemical process. The glass elements and the transparent front contact were cleaned and reused, while >96% of the lead iodide from the perovskite absorber material was recovered in very high purity (>99.96%) before being reused to produce new perovskite mini-modules (see figure).

DIE 4 SCHRITTE DES PEROCYCLE-PROJEKTS THE 4 STEPS OF THE PEROCYCLE PROJECT

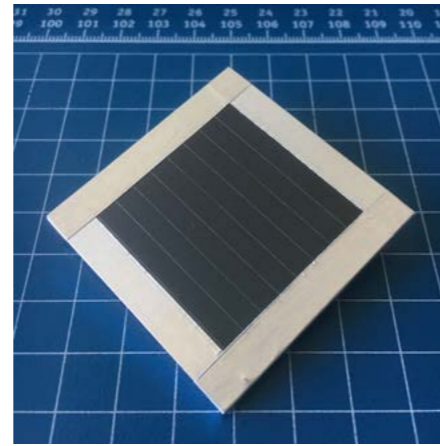


Dr. Cordula Wessendorf
cordula.wessendorf@zsw-bw.de
+49 711 7870-215



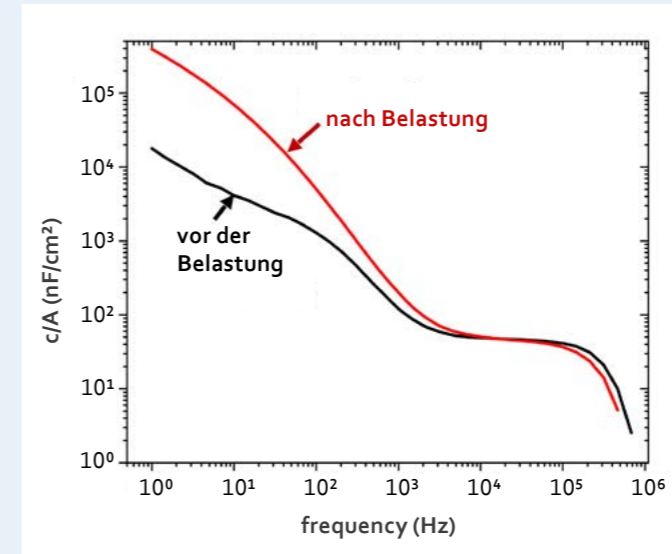
Effizienzen von am ZSW gefertigten Perovskit/CIGS-Tandemmodulen im internationalen Vergleich.

Efficiency level achieved by ZSW-manufactured CIGS-perovskite tandem modules in international comparison.



Am ZSW entwickeltes und gefertigtes Tandemmodul aus CIGS- und Perovskit.

Tandem thin-film solar module combining CIGS and perovskite, developed and manufactured at the ZSW.



Impedanzspektroskopie zeigt signifikant unterschiedliches Verhalten von Proben unter und nach Beleuchtung (simulationsgestützte Analyse).

Impedance spectroscopy highlights significant differences in samples' behaviour before and after light exposure. Simulation-assisted analysis.

CIGS: ENTWICKLUNG EINER STABILEN UNTERZELLE ALS WEGBEREITER ZUM DÜNNSCHICHTTANDEM

Tandemsolarzellen eröffnen das Potenzial, die Energie des Sonnenlichts deutlich effizienter auszunutzen. Dabei werden zwei Solarzellen mit aufeinander abgestimmten Absorptionsbereichen als separate Schichten übereinander angeordnet. Am ZSW werden hierzu verschiedene Materialkombinationen aus Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), Perovskit und dem etablierten Silizium erforscht.

CIGS ist aufgrund seiner flexibel einstellbaren Bandlücke ein besonders vielversprechender Kandidat für die untere Zelle im Perovskit/CIGS-Tandemverbund. Im Rahmen nationaler und internationaler Forschungs- und Entwicklungsprojekte wird daher die Weiterentwicklung von CIGS-Absorbern mit niedriger Bandlücke zusammen mit Partnern aus der Industrie weiter vorangetrieben.

Für kleinflächige Laborzellen werden bereits hohe Wirkungsgrade berichtet. Bei der Realisation von Modulen nimmt allerdings mit wachsender Fläche die Effizienz bei der Stromumwandlung ab. Auf Modulebene festigt das ZSW seine Kompetenz durch den Einsatz industrierelevanter und -kompatibler Fertigungsmethoden in der Herstellung hocheffizienter Tandemmini-module (siehe Abbildung oben). Die Effizienz im Perovskit/CIGS-Tandemmodul mit einer Fläche von 10 cm² konnte auf 22 % erhöht werden.

CIGS: DEVELOPMENT OF A STABLE SUBCELL AS A PRECURSOR TO A THIN-FILM TANDEM

Tandem solar cells have the potential to exploit solar energy with markedly higher efficiency. In these tandem cells, two solar cells with coordinated absorption ranges are directly overlaid in separate layers. Researchers at the ZSW examine various material combinations of Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), perovskite and the established choice, silicon.

In light of its adjustable band gap, CIGS is a particularly promising candidate for the lower cell in a perovskite-CIGS tandem set-up. The ZSW is therefore working with industry partners in national and international research and development projects to drive forward the development of CIGS absorbers with a narrow band gap.

High efficiency levels have been reported for small-scale lab-based cells. When producing modules, however, the power conversion efficiency falls as the surface area increases. At the module level, the ZSW strengthens its expertise by using industry-oriented and compatible manufacturing methods to produce highly efficient tandem mini-modules (see figure). This research has increased the efficiency of a perovskite-CIGS tandem module with a surface area of 10 cm² to 22%.

DEGRADATION DER PEROWSKITE: IMPEDANZSPEKTROSKOPIE ALS SCHLÜSSEL ZUM VERSTÄNDNIS DER ALTERUNG?

Dünnschicht-Solarzellen auf Basis von Perowskiten gelten als vielversprechende Alternative zu klassischen Siliziummodulen, da sie mit deutlich weniger Material und Energie hergestellt werden können. Außerdem erreichen Perovskit-Zellen heute bereits sehr hohe Wirkungsgrade, vergleichbar mit etablierten Technologien. Die größte Herausforderung liegt jedoch in ihrer Langzeitstabilität: bislang sind die Zellen anfällig für Alterung und Materialveränderungen, was ihre breite Anwendung und wirtschaftliche Nutzung bremst. Das ZSW arbeitet deshalb intensiv an neuen Materialstrategien, die die Stabilität erhöhen und die Lebensdauer von Perovskit-Zellen verlängern. Dazu wurden gezielte Belastungstests unter Licht und Temperatur mit modernsten Analysemethoden kombiniert. Besonders die Impedanzspektroskopie eröffnet neue Einblicke in die Bewegung von Ionen innerhalb der Zellen – ein entscheidender Faktor für ihre Degradation. Durch die Verbindung von Experimenten und Simulationen kann ein tieferes Verständnis der Prozesse im Material gewonnen werden und so Konzepte entwickelt werden, die Perovskit-Solarzellen zuverlässiger und wettbewerbsfähiger machen. Damit wird ein wichtiger Beitrag geleistet, diese innovative Technologie für die Energiewende nutzbar zu machen.

PEROVSKITE DEGRADATION: IS IMPEDANCE SPECTROSCOPY THE KEY TO UNDERSTANDING THE AGEING PROCESS?

Perovskite-based thin-film solar cells represent a promising alternative to conventional silicon modules, given the significantly lower material consumption and energy use in their production. At the same time, perovskite cells have already achieved high efficiency levels comparable with established technologies. The greatest challenge, however, lies in their long-term stability. Until now, these cells have been prone to ageing and material changes, which has curbed their widespread adoption and commercial use. This is why, at the ZSW, we are working intensively on new material strategies to increase the stability and extend the useful life of perovskite solar cells. We combine these efforts with targeted light and temperature stress testing using state-of-the-art analysis methods. Impedance spectroscopy in particular opens up new insights into the movement of ions within cells – a decisive factor in the cells' degradation. By combining experiments and simulations, we are furthering our understanding of the processes within the material, which in turn enables us to develop concepts to make perovskite solar cells more reliable and competitive. In doing so, we are making an important contribution to harnessing this innovative technology for the energy transition.



Dr. Rico Gutzler
rico.gutzler@zsw-bw.de
+49 711 7870-260



Ph. D. Ana Kanevce
ana.kanevce@zsw-bw.de
+49 711 7870-266

Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Die Forschungsarbeiten und Dienstleistungen des Fachgebiets MSA konzentrieren sich auf die Sicherung der Qualität und Zuverlässigkeit von Photovoltaik-Modulen (PV-Modulen) sowie auf die effiziente und systemdienliche Nutzung von Solarstrom. Grundlage hierfür sind eine moderne Test- und Messinfrastruktur sowie digitale Modelle von PV-Anlagen zur optimierten Betriebsführung und Einspeisung ins Energiesystem.

Im Testlabor Solab und auf dem Freiland-Testfeld Widderstall werden seit Jahrzehnten PV-Module und -Systeme hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Energieertrag und Alterungsverhalten unter realen und beschleunigten Bedingungen untersucht. Die Prüfinfrastruktur wird kontinuierlich an neue Modultechnologien, innovative Systemkonzepte und größere Modulformate angepasst.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Qualitätsbewertung von PV-Modulen aus Solarparks. Dazu zählen Altersuntersuchungen und Materialanalysen kritischer Komponenten wie Rückseitenfolien, Verkapselungen und Stecker. Die Erkenntnisse fließen in Normungsgremien und die Kundenberatung ein. Zudem unterstützt das ZSW bei der Planung, Ertragsbewertung, Optimierung und Qualitätssicherung von PV-Projekten.

Zur Stärkung der lokalen Solarstromnutzung entwickelt das Fachgebiet Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugung, Speichern, Lasten und Ladeinfrastruktur. MSA bringt sich als Entwicklungspartner in der Anwendung dieser Algorithmen für den Netzbetrieb und Energiemärkte ein und berät gewerbliche Kunden auf dem Weg zur Klimaneutralität.



Dipl.-Ing. Roland Einhaus
roland.einhaus@zsw-bw.de
+49 711 7870-254



»Die starke Diversifizierung der PV-Technologien und -Systeme sowie die Herausforderungen an die Energienetze erfordern eine angepasste Testinfrastruktur und digitale Modellierungskompetenzen, die wir unseren Kunden zur Verfügung stellen.«

»The extensive diversification of PV technologies and systems, combined with grid-related challenges, calls for the adapted test infrastructure and digital modelling expertise we offer our customers.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The research conducted and services offered by the MSA department centre around ensuring the quality and reliability of photovoltaic modules and promoting the efficient and system-strengthening use of solar power. This work is underpinned by modern testing and measurement infrastructure, along with digital models of photovoltaic systems for optimised operation and feed-in to the energy system.

For decades, PV modules and systems have undergone testing at the Solab test laboratory and the Widderstall outdoor test site, which enable researchers to examine their performance, energy yield and ageing behaviour under both real and accelerated conditions. The testing infrastructure is continuously adapted to new module technologies, innovative system concepts and larger module formats.

Quality assessment of PV modules from solar farms is another focus area. This includes conducting ageing testing and material analyses of critical components, such as back panel films, encapsulation films and connectors. The insights are incorporated into the work of standardisation bodies and into customer consultancy. Furthermore, the ZSW consults on photovoltaic projects during the planning phase regarding yield calculation, optimisation and quality assurance.

In an effort to increase local use of solar power, the MSA department is also developing algorithms for optimised operation of generation, storage, load management and charging infrastructure. As a development partner, the department supports the deployment of these algorithms for grid operation and energy markets, advising commercial customers on their journey to climate neutrality.



Mechanischer Belastungstest an PV-Modulen im ZSW Solab.

Mechanical stress testing of PV modules in the ZSW Solab.

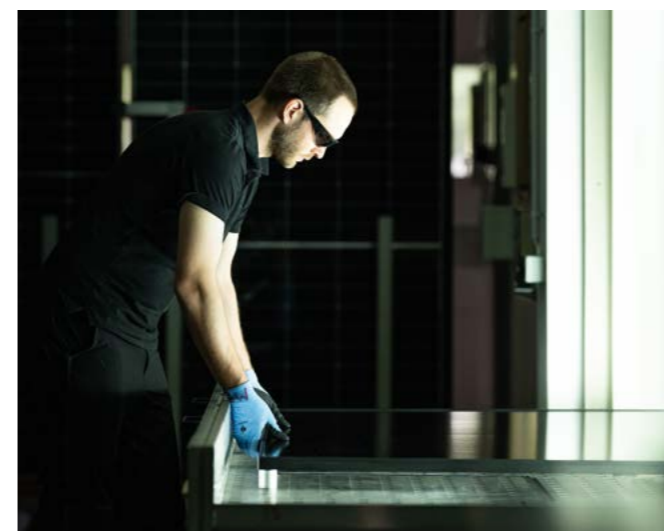
ZSW SOLAB: ZUVERLÄSSIGE QUALITÄTSBEWERTUNG MODERNER PV-MODULE

Das ZSW Solab unterstützt Stakeholder des PV-Downstream-Sektors (Projektentwickler, PV-Kraftwerksbetreiber, Versicherer) mit langjähriger Expertise in standardisierten Qualitätsprüfungen und präzisen Messverfahren bei der fundierten Auswahl und Bewertung von PV-Modulen. Im Fokus stehen aktuelle Modulttechnologien auf der Basis von TOPCon- (Tunnel Oxide Passivated Contact), HJT- (Heterojunction Technology) und IBC- (Interdigitated Back Contact) Solarzellen. Ein neu entwickeltes, zentrales Datenmanagementsystem ermöglicht die effiziente automatisierte Auswertung der Messergebnisse und liefert belastbare Grundlagen für die Qualitätsbewertung von PV-Modulen. Ergänzend zu den Prüfdienstleistungen untersucht das ZSW Solab das Langzeit- und Degradationsverhalten moderner Modulttechnologien, um potenzielle Leistungs- und Zuverlässigkeitsrisiken frühzeitig identifizieren zu können und die dahinter liegenden Mechanismen zu verstehen. Unterstützend wird hierzu die im Fachbereich MAT angesiedelte Analytikinfrastruktur hinzugezogen. Schwerpunkte der Analysen sind Wechselwirkungen zwischen Modulkomponenten, Umwelteinflüsse wie UV-Belastung, die mechanische Stabilität von Glas-Glas-Modulen sowie das elektrische Isolationsverhalten. In diesem Zusammenhang wurde die Testinfrastruktur durch eine größere Klimakammer erweitert sowie verschiedene Teststände, wie der mechanische Belastungstest, durch eine digitale Ansteuerung modernisiert.

ZSW SOLAB: RELIABLE QUALITY ASSESSMENT OF MODERN PV MODULES

Drawing on its years of experience in standardised quality assessments and precise measurement processes, the ZSW Solab helps stakeholders in downstream PV sectors (such as project developers, PV system operators and insurance providers) to make sound selections and evaluations of photovoltaic modules. Its work focuses on the latest module technologies based on tunnel oxide passivated contact (TOPCon), heterojunction technology (HJT) and interdigitated back contact (IBC) solar cells. A newly developed central data management system facilitates efficient and automated evaluation of measurement results and provides a solid basis for quality assessment of PV modules.

In addition to these testing services, the ZSW Solab investigates the long-term and degradation behaviour of modern module technologies in order to identify potential performance and reliability risks at an early stage and understand the underlying mechanisms. This work draws on the MAT department's analytics infrastructure for additional support. These analyses focus on the interactions between module components, environmental influences such as UV exposure, the mechanical stability of glass-glass modules and electrical insulation properties. In this context, the test infrastructure has been supplemented with a new, larger climatic chamber, while various test benches – including the mechanical stress test bench – have been modernised with digital control systems.



Vorbereitung eines UV-Belastungstests (nach ISO 61215) an einem kommerziellen PV-Modul.

Preparation of a UV exposure test (according to ISO 61215) on a commercial PV module.



Dipl.-Ing. Roland Einhaus
roland.einhaus@zsw-bw.de
+49 711 7870-254



SOLARTESTFELD WIDDERSTALL

Das Solartestfeld Widderstall bei Merklingen wird vom ZSW seit 1989 für Freifelduntersuchungen von PV-Modulen und -Systemen unter realen Betriebsbedingungen genutzt. Die gewonnenen Langzeitdaten liefern belastbare Aussagen zu Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit sowie Degradationsmechanismen unterschiedlicher PV-Technologien und bilden damit eine wichtige Grundlage für die Bewertung von Ertragsrisiken. In Verbindung mit Laborprüfungen im ZSW Solab ermöglichen sie eine realitätsnahe Qualitätsbewertung von PV-Modulen und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Investitionssicherheit und Bankability von PV-Projekten.

Ein neu errichteter Teststand adressiert zentrale Fragestellungen der bauwerksintegrierten Photovoltaik (BIPV), insbesondere bei fassadenintegrierten PV-Modulen (siehe Abbildung unten). Untersucht wird der Einfluss dynamischer Teilverschattung auf die Leistungsfähigkeit und Langzeitstabilität unterschiedlicher Modultechnologien, darunter farbige und rückseitenkontaktierte IBC-Module. Die im Stringbetrieb über Wechselrichter am Maximum Power Point (MPP) gehaltenen Module werden regelmäßig mittels Thermografie auf lokale Temperaturerhöhungen und mögliche Hotspot-Bildung analysiert. Ergänzend liefern periodisch durchgeführte Stromspannungs-Kennlinienmessungen unter Standardtestbedingungen sowie Elektrolumineszenzaufnahmen im Labor belastbare Aussagen zur Alterung und Langzeitstabilität der Module.



Fassaden-PV-Teststand zur Untersuchung des Einflusses von dynamischen Teilverschattungssituationen auf die Langzeitstabilität verschiedener Modultechnologien.

Façade-integrated PV test bench to investigate the influence of dynamic partial shading situations on the long-term stability of different module technologies.

WIDDERSTALL SOLAR TEST SITE

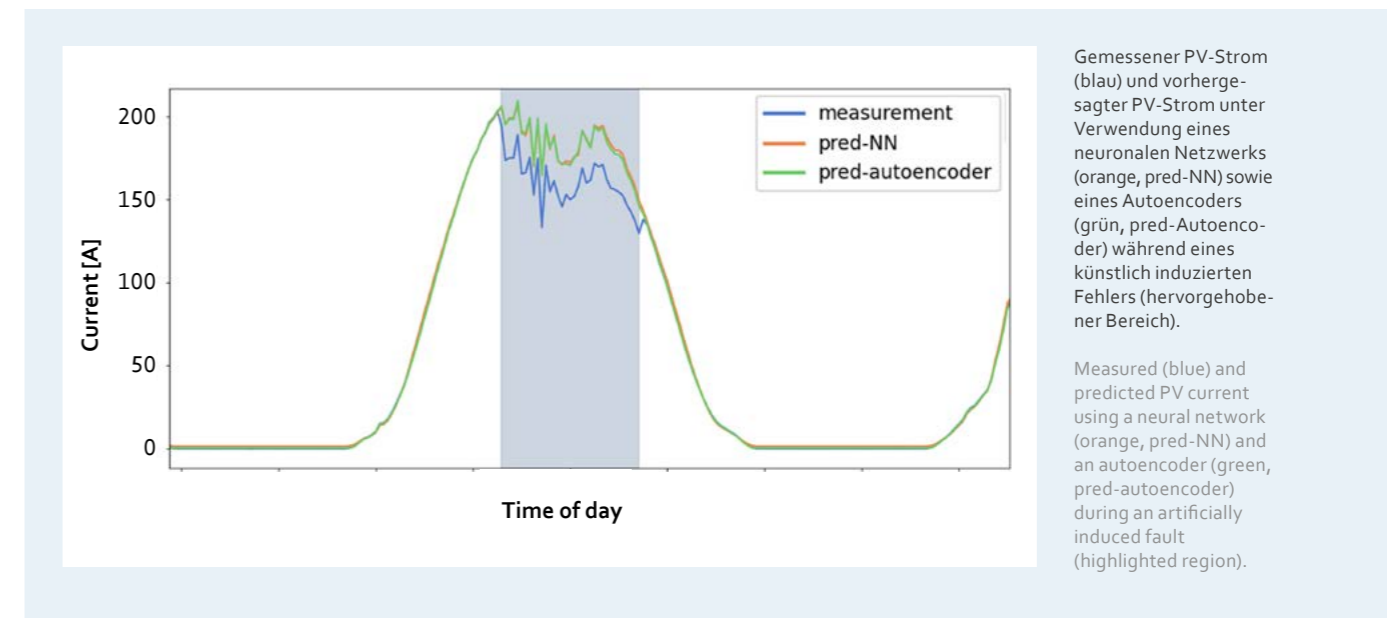
The ZSW has used the Widderstall solar test site near Merklingen to conduct outdoor field testing of photovoltaic modules and systems under real operating conditions since 1989. The collected long-term data makes it possible to formulate robust statements on the performance, reliability and degradation mechanisms of different PV technologies and thus provides a key basis for the assessment of yield risks. In conjunction with lab-based testing at the ZSW Solab, this real-world testing permits realistic quality assessment of PV modules and makes a vital contribution to the investment security and bankability of photovoltaic projects. A newly installed test bench addresses central issues of building-integrated photovoltaics (BIPV), in particular façade-integrated PV modules. ZSW researchers are examining the influence of dynamic partial shadowing on the performance and long-term stability of different module technologies, including coloured and back-contact IBC modules. Connected in a string and held at the maximum power point (MPP) by inverters, the modules are subject to regular thermographic analysis to check for local temperature increases and potential hotspot formation. In addition, periodic current-voltage characteristic measurements under standard test conditions and electroluminescence imaging in the lab permit substantiated statements on modules' ageing and long-term stability.

KI-BASIERTE ANOMALIEERKENNUNG IN BIFAZIALEN PV-PARKS

Die zunehmende Größe und Komplexität moderner PV-Parks mit bifazialen Modulen sowie heterogenen Geländestrukturen stellen neue Anforderungen an das Anlagenmonitoring. Da im Betrieb oft nur aggregierte Strommesswerte auf Wechselrichter-eingangsebene vorliegen, stoßen konventionelle Modellansätze zur Leistungsbewertung und Fehlererkennung an ihre Grenzen. Im Forschungsprojekt KIMBIF (gefördert vom Bundeswirtschaftsministerium) entwickeln das ZSW und die EnBW Energie Baden-Württemberg AG datenbasierte KI-Modelle zur Anomalieerkennung in großen bifazialen PV-Parks. Ziel ist, Fehler einzelner Modulstränge aus aggregierten Betriebsdaten zu erkennen und übertragbare Modellstrukturen für unterschiedliche Anlagen zu schaffen. Grundlage dafür sind Betriebsdaten aus PV-Parks in Deutschland und Südfrankreich mit variierenden Konzepten und unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen. Ergänzend wurden die rückseitige Einstrahlung und Bodenrückstrahlung gemessen sowie gezielt Strangfehler erzeugt, um Trainings- und Validierungsdaten zu gewinnen. Untersucht werden verschiedene neuronale Netzarchitekturen wie Feed-Forward-Netze und Autoencoder. Beide Ansätze bilden eine geeignete Grundlage, um eine hohe Vorhersagegüte und eine robuste Fehlerdetektion auch unter anspruchsvollen Bedingungen, etwa bei Abregelung, zu erreichen. Die KI-gestützte Analyse ergänzt bestehende Monitoringverfahren und verbessert die Betriebszuverlässigkeit bifazialer PV-Parks.

AI-BASED ANOMALY DETECTION IN BIFACIAL PV FARMS

The growing scale and complexity of modern PV farms with bifacial modules and heterogeneous terrain presents new challenges for system monitoring. In operation, only aggregated current measurements are available at the inverter input level, which is where conventional performance assessment and fault detection modelling approaches reach their limits. In the KIMBIF research project, the ZSW and EnBW Energie Baden-Württemberg AG are developing data-based AI models for anomaly detection in large-scale bifacial PV parks. The aim is to detect errors in individual module strings from aggregated operating data and produce transferable model structures for different systems. This research is based on operating data from PV farms in Germany and southern France, covering a variety of concepts and climatic conditions. In addition, the back-panel irradiation and ground reflectance were measured and string faults produced in order to generate training and validation data. Different neural net architectures are under consideration, including feed-forward nets and autoencoders. Both approaches provide a suitable basis upon which to achieve high forecasting quality and robust fault detection, even under challenging conditions, such as curtailment. AI-assisted analysis supplements existing monitoring techniques and improves the operational reliability of bifacial PV farms.



Dipl.-Ing. Roland Einhaus
roland.einhaus@zsw-bw.de
+49 711 7870-254



Jonas Petzschmann
jonas.petzschmann@zsw-bw.de
+49 711 7870-160

Akkumulatoren Materialforschung (ECM)

Accumulators Materials Research (ECM)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das Fachgebiet ECM entwickelt Materialien und Prozesse für die nächsten Generationen von Lithium-Ionen-Batterien sowie Post-Lithium-Konzepte wie Natrium-Ionen-, Magnesium- oder Kalzium-Systeme.

Ziel ist es, die Zellperformance und Nachhaltigkeit in allen Schritten vom Material bis zur Batterie zelle zu steigern und kritische Rohstoffe zu vermeiden. Das Themenfeld Natrium-Ionen wurde entlang der gesamten Fertigungskette weiter ausgebaut und auf Alterungsuntersuchungen ausgeweitet. Die Abscheidung metallischen Natriums wurde als eine wesentliche Alterungsursache nachgewiesen.

Mit Powder-Up! ist nun erstmals in Deutschland eine industriennahe Forschungs- und Produktionsanlage für maßgeschneiderte Kathodenmaterialien in Betrieb. Das Synthesetechnikum schließt die Skalierungslücke zwischen Laborentwicklung und industrieller Materialsynthese. Es ist flexibel auf neue Materialien und Prozesse sowie deren Skalierung bis in den 100-kg-Maßstab ausgelegt.

In der Elektrodenentwicklung wird an der Vermeidung giftiger Lösungsmittel und PFAS-basierter Binder sowie nachhaltigen lösemittelfreien Prozessen gearbeitet. Für Hochleistungszellgeometrien mit tabless Design wurde eine Anlage zum automatisierten Laserschneiden neuer Ableiterstrukturen sowie eine entsprechende Wickeleinheit in Betrieb genommen.

Das Fachgebiet erforscht darüber hinaus Alterungsmechanismen an verschiedensten Zellen. Auf der Basis des generierten Wissens werden Maßnahmen zur Erhöhung der Lebensdauer abgeleitet. Mit dem Bereich Direktrecycling von Speichermaterialien hat sich in ECM ein neuer Bereich mit stark steigender Nachfrage etabliert.



Dr. Peter Axmann
Head of Department
peter.axmann@zsw-bw.de
+49 731 9530-404



»Für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Batterieproduktion in Deutschland ist ein rascher Transfer innovativer Forschungsergebnisse in die industrielle Anwendung entscheidend. Eine koordinierte Strategie zwischen Forschung, Industrie und Politik ist dafür essentiell.«

»The swift transfer of innovative research findings into industrial practice will be decisive for the establishment of competitive battery production in Germany. A coordinated strategy between research, industry and political actors is essential to achieve this.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The ECM department develops materials and processes for the next generation of lithium-ion batteries, along with post-lithium concepts such as sodium-ion, magnesium and calcium-based systems.

It aims to enhance cell performance and improve sustainability at every stage, from raw materials to finished battery cells, and avoid the use of critical raw materials. The topic of sodium-ion technology has been further elaborated throughout the entire manufacturing chain and supplemented with ageing testing.

The precipitation of metallic sodium has been identified as an important cause of ageing.

Powder-Up! is Germany's first operational, industry-oriented research and production facility for customised cathode materials.

The synthesis pilot plant closes the gap between laboratory-scale and industry-scale material synthesis. It has the flexibility to accommodate new materials and processes and scale them up to quantities of 100 kg.

Research in the field of electrode development includes avoiding toxic solvents and PFAS-based binders and developing sustainable solvent-free processes. An automated laser-cutting machine for new conductor structures has been commissioned along with a corresponding winding unit to facilitate high-performance cell geometries with tabless design.

The department is also investigating ageing mechanisms in a wide variety of cells, with the resulting insights used to develop measures to extend the useful life of cells.

By establishing expertise in the direct recycling of storage materials, ECM has identified a new field with rapidly growing demand.

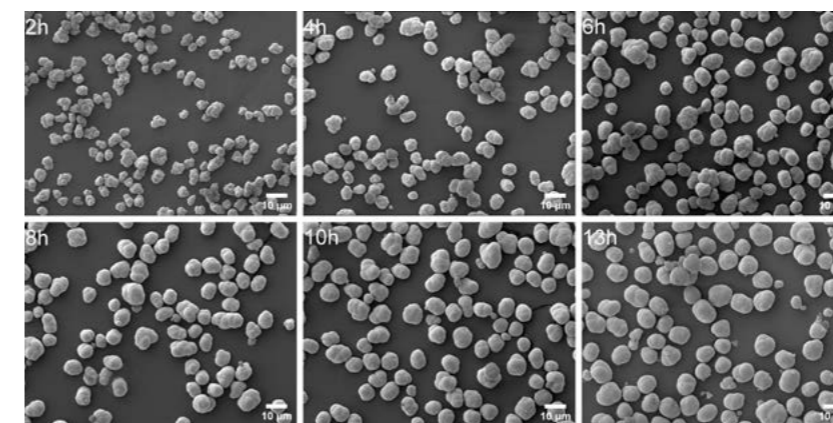
DISCONTINUOUS PRECIPITATION SYNTHESIS

Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide (NMC) ändern mit dem Ladezustand ihr Kristallvolumen, was im Betrieb mechanische Spannungen im Korn verursacht (Rissbildung); gleichzeitig verdichtet sich die Oberflächenstruktur. Beide Effekte verschärfen sich zunehmend mit dem Nickelanteil, wodurch das Material schneller altert.

In Gradientenmaterialien ändert man bei der Synthese die Zusammensetzung der Partikel von innen nach außen. Das Konzept: man verpackt einen reaktiven Kern in eine weniger reaktive Hülle und verringert so die Alterungseffekte. Gradientenmaterialien sind aus dem Labormaßstab bekannt, können aber nicht kommerziell in größeren Mengen bezogen werden. Im Rahmen des Projekts GN_BATT wurden im Synthesetechnikum Powder-Up! die Grundsätze zur Herstellung von Materialien gradierter Partikelstruktur erarbeitet. Ziel war es, in kurzer Zeit eine technische und wissenschaftliche Grundkompetenz für eine solche Synthese aufzubauen und die Skalierbarkeit zu demonstrieren. Begleitet wurde die Entwicklung vom Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Institut (NMI) in Reutlingen mit hochauflösenden Untersuchungen der Partikelmikrostruktur. Die obere Abbildung zeigt das lineare Wachstum der Partikel im Verlauf der Fällung. Ändert man im Reaktionsverlauf den Anteil der Metallkomponenten, so ändert sich auch die Zusammensetzung der aufwachsenden Schicht. Sprunghafte Änderungen führen zum Kern-Schale-Aufbau (siehe Abbildung unten), lineare Änderungen zu Gradientenmaterialien.

DISCONTINUOUS PRECIPITATION SYNTHESIS

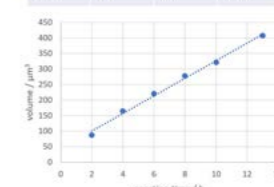
The crystal structures of lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC) batteries expand and contract during charging and discharging, which causes mechanical stresses in their core (crack formation) during operation. At the same time, the surface structure becomes denser. Both effects intensify as the proportion of nickel increases, which causes the material to age faster. Gradient materials are configured during synthesis to have a particle composition that changes from inside to outside. The concept developed in this context is to encapsulate a reactive core inside a less reactive enclosure, thereby reducing the ageing effects. Although gradient materials are well established at laboratory scale, they are not available in larger quantities. In the GN_BATT project, researchers at the Powder-Up! pilot plant identified fundamental steps for producing materials with a gradient particle structure. This fast-paced project aimed to develop the fundamental technical and scientific knowledge needed to establish such synthesis processes and demonstrate their scalability. Development activities were supported by the Natural and Medical Sciences Institute (NMI) in Reutlingen with high-resolution examination of particle microstructures. The upper of the two images below shows the linear growth of particles during precipitation. Changing the proportion of metal components during the reaction process also changes the composition of the growing layer. Sudden changes result in a core-shell structure (see images below), while linear changes produce gradient materials.



	D10 µm	D50	D90
2h	3.1	5.5	9.4
4h	4.2	6.8	11.1
6h	4.8	7.5	11.9
8h	5.3	8.2	12.6
10h	5.7	8.5	12.8
13h	6.3	9.2	13.9

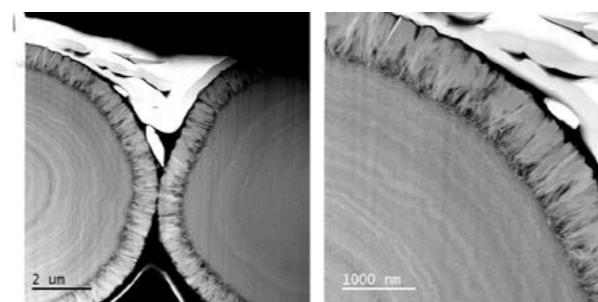
Partikelwachstum im Reaktionsverlauf (Rasterelektronenmikroskopie).

Particle growth during the reaction process (scanning electron microscopy).



Kern-Schale-Architektur mit dichtem Partikelkern und radialstrahlig aufwachsender Schalenstruktur (FIB-Lamelle, Transmissionselektronenmikroskopie).

Core-shell architecture with a dense particle core and a radial shell structure (FIB lamella, transmission electron microscopy).



Das Projekt GN_BATT wurde vom Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg gefördert.

The »GN_BATT« project was funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, Labour and Tourism.



Dr. Peter Axmann
peter.axmann@zsw-bw.de
+49 731 9530-404

PFAS-FREIE LITHIUM-IONEN-BATTERIEN DURCH KONTINUIERLICHE SLURRY-MISCHPROZESSE

Moderne Energiespeichersysteme sollen Nachhaltigkeit mit hoher Energiedichte, Lebensdauer und Kosteneffizienz in einer Kreislaufwirtschaft vereinen.

Konventionelle Lithium-Ionen-Batterien nutzen häufig nickelreiche NMC-Kathoden (Oxide aus Nickel-Mangan-Cobalt), die mit NMP (N-Methyl-2-pyrrolidon) und fluorierten Bindern verarbeitet werden. Wasserbasierte Beschichtungsverfahren sind für Anoden etabliert, jedoch bisher nicht für hochspannungsfähige nickelreiche NMC-Kathoden. Ein PFAS-freier Ansatz ist daher ökologisch und wirtschaftlich besonders relevant.

In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten DigiBatt-Pro4-Projekt wurden PFAS-freie, wasserbasierte NMC-Kathoden im Pilotmaßstab entwickelt und in 21700-Zellen erfolgreich validiert. Durch pH-Anpassung und optimierte Prozessparameter entstanden ≈ 100 m lange Elektroden mit guter Langzeitstabilität. Nebenreaktionen konnten durch geringe Wassermengen, kurze Mischzeiten und eine optimierte Trocknung reduziert werden. Ein neuer extrusionsbasierter kontinuierlicher Mischprozess ermöglicht eine präzise Additivdosierung und reduziert die Mischzeit von Stunden auf Minuten wodurch ein industriell skalierbarer Prozess entsteht. Die wässrige Aufschlämmung (96 % Aktivmaterial) lässt sich direkt auf ungrundierte Aluminiumfolie auftragen. Die resultierenden Elektroden zeigen Zyklenstabilität und Widerstandswerte vergleichbar mit NMP-basierten Referenzen – ein wichtiger Schritt zu einer nachhaltigen, PFAS-freien Kathodenproduktion.

PFAS-FREE LITHIUM-ION BATTERIES MADE IN CONTINUOUS SLURRY MIXING SYSTEMS

Modern energy storage systems need to combine sustainability with high energy density, a long service life, high cost efficiency and compatibility with the circular economy.

Conventional lithium-ion batteries often rely on nickel-rich NMC cathodes (oxides made from nickel, manganese and cobalt), which can be processed with NMP (N-methyl-2-pyrrolidone) and fluorinated binders. But while water-based coating techniques have been established for anodes, this is not yet the case for nickel-rich NMC cathodes capable of handling high voltages. A PFAS-free approach would offer significant environmental and economic benefits.

The DigiBattPro4 project funded by the Federal Ministry of Research, Technology and Space (BMFTR) successfully developed PFAS-free, water-based NMC cathodes at pilot scale and validated them in 21700-type cells. Adjusting the pH and optimising the process parameters resulted in ≈ 100 -metre-long electrodes with good long-term stability. Side reactions were minimised through low water quantities, short mixing times and optimised drying.

A new extrusion-based continuous mixing process facilitates precise additive dosing and reduces the mixing time from hours to minutes, creating an industrially scalable process. The aqueous slurry (96% active material) can be applied directly to unprimed aluminium foil. The resulting electrodes demonstrate comparable cycle stability and resistance figures with NMP-based reference components – which marks an important step towards sustainable, PFAS-free cathode production.

POST-MORTEM-ANALYSE VON NATRIUM-PLATING IN KOMMERZIELLEN NATRIUM-IONEN-BATTERIEN

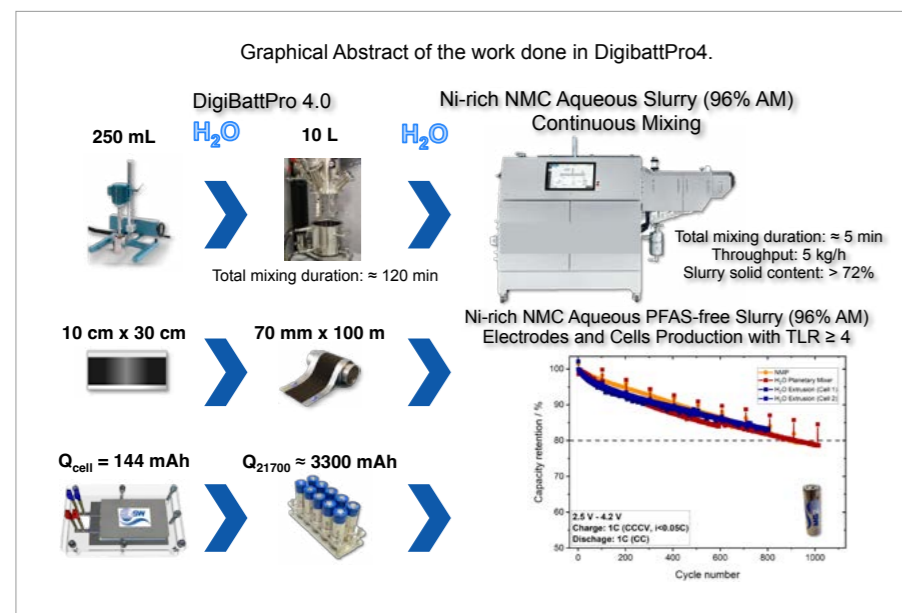
Um die Alterungsmechanismen kommerzieller Natrium-Ionen-Batterien besser zu verstehen, wurden gealterte Zellen mittels Post-mortem-Analyse untersucht. Nach der Zyklierung wurde als Hauptalterungsmechanismus die Abscheidung von Natriummetall auf den Hard-Carbon-Anoden gefunden. Die Abbildung zeigt, dass das abgeschiedene Natriummetall dendritisch wachsen kann. Natriummetall reagiert an seiner Oberfläche mit dem Elektrolyten, was zu irreversiblen Kapazitätsverlust und Zunahme des Innenwiderstands führt.

Es konnte gezeigt werden, dass Natriumabscheidungen vor allem beim Laden bei tiefen Temperaturen auftreten – ähnlich wie Abscheidungen von Lithiummetall auf Graphit in Lithium-Ionen-Batterien. Analog hierzu kann das Auftreten von Natriumabscheidungen auch mit weiteren physikalisch-chemischen Analysemethoden (z. B. EDX) oder elektrochemisch (z. B. in Vollzellen mit Natriumreferenzelektrode) analysiert werden. Erste Ergebnisse mit Accelerating Rate Calorimetry (ARC) zeigten außerdem, dass sich Natriumabscheidungen negativ auf die thermische Sicherheit von Natrium-Ionen-Zellen auswirken können.

POST-MORTEM ANALYSIS OF SODIUM PLATING IN COMMERCIAL SODIUM-ION BATTERIES

In an effort to better understand the ageing mechanisms in commercial sodium-ion batteries, post-mortem analyses have been conducted on aged cells. Following cyclisation, the deposition of sodium metal onto hard carbon anodes was identified as the primary ageing mechanism. The figure shows that deposited sodium can grow with a dendritic structure. The sodium metal reacts on its surface with the electrolyte, which leads to an irreversible capacity loss and an increase in internal resistance.

Researchers at the ZSW have demonstrated that sodium deposition can occur during charging at low temperatures – similar to the deposition of lithium metal on graphite in lithium-ion batteries. In line with this, sodium deposits can also be analysed with other physicochemical analytics methods (e.g. EDX) as well as electrochemical methods (e.g. in 3-electrode full cells with sodium reference electrodes). First results from accelerating rate calorimetry (ARC) have also shown that sodium deposits can negatively impact the thermal safety of sodium-ion cells.



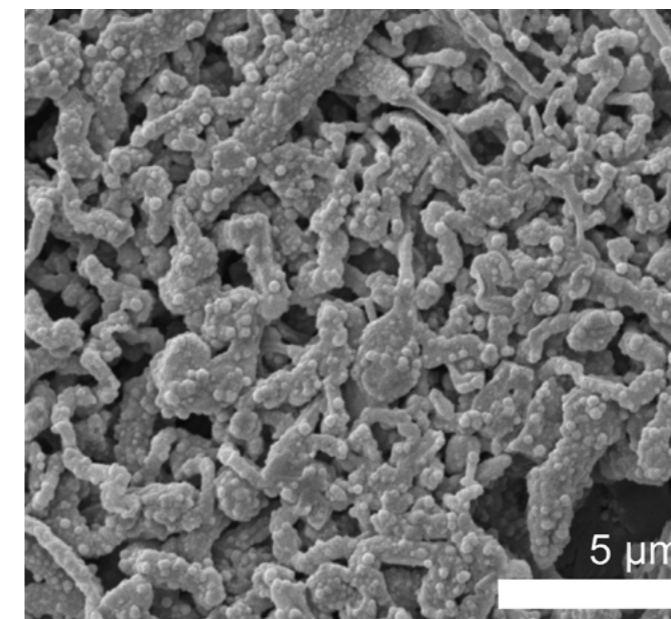
Lesen Sie die wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Thema PFAS-freie Lithium-Ionen-Batterien.

Read the scientific paper on PFAS-free lithium-ion batteries.



Grafische Darstellung der Arbeiten im DigiBattPro4-Projekt.

Graphical abstract illustrating the progress made in the DigiBatt-Pro4 project.



Dendritische Natriumabscheidungen (REM-Aufnahme).

Dendritic sodium deposits (SEM image).

QR-Code scannen und die wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu dendritischen Natriumabscheidungen lesen.

Scan the QR code to read the scientific papers on dendritic sodium deposits.



Mehr über Post-Mortem-Analysen auf unserer Website:

Find out more about post-mortem analyses on our website:



Dr. Rares-George Scurtu
rares-george.scurtu@zsw-bw.de
+49 731 9350-545



PD Dr. rer. nat. Thomas Waldmann
thomas.waldmann@zsw-bw.de
+49(0)731-9530-212

Produktionsforschung (ECP)

Production Research (ECP)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Die serienmäßige Produktion großer Lithium-Ionen-Zellen, wie sie in Elektroautos oder in stationären Speichern verwendet werden, stellt besondere Anforderungen an die Sicherheit und Genauigkeit der einzelnen Prozessschritte. Je höher deren Qualität und Reproduzierbarkeit ist, desto zuverlässiger, langlebiger und kostengünstiger wird die Batterie.

Der Schwerpunkt des Fachgebiets ECP liegt in der Entwicklung und seriennahen Produktion von prototypischen Batteriezellen. Hierfür betreibt das Fachgebiet eine »Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen« (FPL). Im Zentrum steht das Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit, Herstellungskosten, Inline-Sensorik, Fertigungstoleranzen und effizienten Abläufen. Bei neuen Materialien und Komponenten stehen die Verarbeitbarkeit, Performance und Qualität im Fokus.

Das ECP-Team besteht aus Fachkräften aus den Bereichen Technik, Ingenieurwesen und Naturwissenschaft. Ihre Kernaufgabe ist es, industrielle Produktionsprozesse zu optimieren und fortschrittliche Zellchemie in Musterserien von Standardzellen zu verifizieren. Die Forschung deckt alle produktionsnahen Themen ab – von Prototypen über Prozess- und Qualitätssicherungsverfahren bis zu digitalen Methoden in der Batteriezellfertigung. Mit seinen Produktionsanlagen ist das Fachgebiet Teil des Dachkonzepts »Forschungsfabrik Batterie« des Bundesforschungsministeriums, das eine technologisch souveräne, wettbewerbsfähige und gleichzeitig nachhaltige Batteriewertschöpfungskette in und für Deutschland und Europa aufbauen soll.



Dr. Wolfgang Braunwarth
Head of Department
wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de
+49 731 9530-562



»Mit der erweiterten Forschungsproduktionslinie unterstützen wir unsere Partner bei der Entwicklung und Erprobung innovativer, industrietauglicher Konzepte für Materialien, Zellen und Produktion.«

»Our extended research production line is our way of assisting our partners with the development and testing of innovative, industrial-grade concepts for materials, cell designs and production systems.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

Series production of large-scale lithium-ion cells, such as those used in electric vehicles and stationary storage systems, places particular demands on the safety and precision of individual process steps. The higher their quality and reproducibility, the more reliable, durable and cost-efficient the resulting batteries. The ECP department focuses on the development and close-to-series production of prototype battery cells. As part of this, it operates a »research platform for the industrial production of lithium-ion cells« (FPL). Its work focuses on the combination of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in relation to quality, safety, manufacturing costs, in-line sensors, production tolerances and efficient processes. When it comes to new materials and components, ECP focuses on evaluating their processability, performance and quality.

The ECP team consists of experienced technicians, engineers and scientists whose main brief is to optimise industrial production processes and verify advanced cell chemistry in lines of standard cell samples. Their research encompasses all production-related issues, from prototyping to process and quality control procedures through to digital methods in battery cell production. Owing to its production facilities, the department is part of the »Battery Cell Research Factory« umbrella strategy adopted by the Federal Ministry of Research, Technology and Space with a view to establishing a technologically sound, competitive and yet sustainable battery value chain in and for Germany and Europe.



Laservereinzelung zur formatflexiblen Produktion von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen.

Laser-based separation for format-flexible production of large-scale lithium-ion cells.

SICHERHEITSRELEVANTE QUALITÄTSSICHERUNG IN DER ZELLASSEMBLIERUNG

Für eine erfolgreiche Batteriezellproduktion ist es unerlässlich, die Qualitätssicherung als ganzheitliche Disziplin auf allen Ebenen der Materialherstellung, -prozessierung und -assemblierung der fertigen Zelle zu betrachten und weiterzuentwickeln. Nur so lässt sich kritischer Ausschuss vermeiden und die Wettbewerbsfähigkeit einer Produktion in Deutschland gewährleisten. Das vom Bundesforschungsministerium im Rahmen des Kompetenzclusters für Analytik und Qualitätssicherung – AQua – geförderte und erst kürzlich abgeschlossene Projekt QuaLiZell beschäftigte sich mit der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse sowie Qualitätssicherung zu sicherheitskritischen Aspekten der Produktion von großformatigen prismatischen Lithium-Ionen-Zellen.

Die Arbeiten am ZSW im Rahmen des Projekts bestanden in der Identifikation und anschließend in der Katalogisierung sicherheitsrelevanter Fehlerquellen in den Produktionsschritten Schneiden, Laservereinzelung, Wickeln und Stapeln. Hierzu wurden durch gezieltes Einbringen von Zellfehlern Wirkzusammenhänge aufgeklärt. Um die Ausschussquote in der Massenproduktion herabzusetzen, wurden Toleranz- und Eingriffsgrenzen soweit möglich quantifiziert und eine analytische In-Line-Methode zur frühzeitigen Erkennung von Produktionsfehlern eingeführt.

SAFETY-RELATED QUALITY CONTROL IN CELL ASSEMBLY

Regarding and refining quality control as a holistic discipline across all levels of material manufacturing, material processing and cell assembly is essential for successful battery cell production. This is the only way to avoid critical levels of rejects and secure the competitive position of production in Germany.

The recently concluded QuaLiZell project, which was funded by the Federal Ministry of Research, Technology and Space (BMFTR) as part of the Analytics and Quality Assurance (AQua) competence cluster, focused on failure detection and effects analysis along with quality assurance in relation to safety-critical aspects in the production of large-scale prismatic lithium-ion cells.

The ZSW's contributions to the project comprised the identification and subsequent cataloguing of safety-related error sources in several production steps: cutting, laser-based separation, winding and stacking. Cell failures were deliberately induced to shed light on the mechanisms involved. In an effort to reduce the reject rate in mass production, tolerance and intervention limits were quantified where possible and an analytical in-line method introduced for early identification of production defects.



Dr. Wolfgang Braunwarth
wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de
+49 731 9530-562

FASER- UND SILIZIUMBASIERTE ANODEN FÜR NACHHALTIGE LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Im Forschungsprojekt FACILE zur »Entwicklung und Herstellung innovativer, faser- und siliziumbasierter Anodenmaterialien für leistungsfähige und nachhaltig produzierte Li-Ionen-Batterien« (gefördert vom Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg) wird ein neuartiger Ansatz. Ziel ist es, die praktische Energiedichte auf der Anodenseite um bis zu 250 Prozent zu steigern und gleichzeitig den ökologischen Fußabdruck der Akkus zu verkleinern.

Der Projektansatz kombiniert etablierte Verfahren aus der Papier- und Vliesstoffproduktion mit industriellen Beschichtungstechniken aus der Halbleiter- und Photovoltaiktechnologie. Im Fokus steht die Entwicklung einer Hochdurchsatzanlage zur Siliziumbeschichtung von Faserstoffen sowie die Untersuchung geeigneter Vliesmaterialien und deren Verbindung mit Kupferfolien. Materialanalysen dienen der Bewertung der strukturellen und elektrochemischen Eigenschaften.

Die Charakterisierung, Fertigung und elektrochemische Prüfung der faserbasierten Anoden in großen Batteriezellen erfolgt am ZSW in Ulm. Das Projekt wird von der centrotherm international AG koordiniert. Weitere Partner sind das ISC Konstanz e. V., die Phoenix NonWoven GmbH & Co. KG sowie der Bereich Photovoltaik der Universität Konstanz.

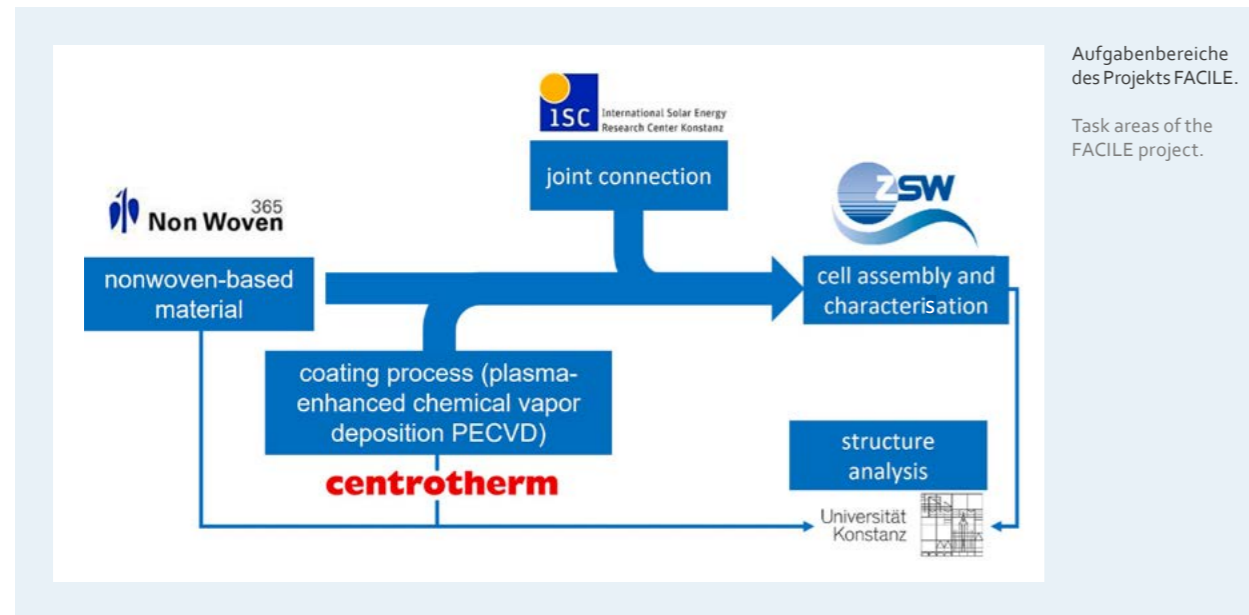
FIBRE AND SILICON-BASED ANODES FOR SUSTAINABLE LITHIUM-ION BATTERIES

Researchers in the »Development & Production of Innovative, Fibre- and Silicon-Based Anode Materials for High-Performance and Sustainably Produced Li-Ion Batteries« research project – or FACILE for short – are pursuing a novel approach to produce fibre-based silicon anodes. The aim is to increase the practical energy density on the anode side by up to 250% while simultaneously improving the batteries' ecological footprint. The project's approach combines methods established in the production of paper and non-woven fabrics with industrial coating techniques used in relation to semiconductor and photovoltaic technologies. Its focus is developing a high-throughput silicon coating system for fibre materials and examining suitable non-woven materials and their combination with copper foil. Material analyses serve to evaluate the structural and electrochemical properties.

Characterisation, production and electrochemical analysis of the fibre-based anodes in battery cells takes place at the ZSW in Ulm. The project is coordinated by centrotherm international AG. Phoenix NonWoven GmbH & Co. KG, ISC Konstanz e. V. and the Photovoltaics division at the University of Konstanz are also project partners.

i FACILE ist am 1. Juli 2025 gestartet, läuft 24 Monate bis zum 30. Juni 2027 und wird vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit 1,28 Mio. Euro gefördert.

i The FACILE project started on 1 July 2025 and is set to run for 24 months until 30 June 2027. It has received €1.28 million in funding from the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs.



Dr. Hai Yen Tran
hai-yen.tran@zsw-bw.de
+49 731 9530-345

BATTERIEN BEKOMMEN DIGITALEN PRODUKTPASS

Der European Green Deal fordert für Batterien ab 2027 einen digitalen Produktpass, um Informationen über Qualität und Umwelteinwirkungen transparent zur Verfügung zu stellen. Um dies zu unterstützen, hat ECP einen Prozessleitstand (PLS) eingeführt, der während der Produktion alle relevanten Daten erfasst, strukturiert und zentral zusammenführt.

Dieser PLS ermöglicht darüber hinaus die Digitalisierung aller Zellproduktionsprozesse: Über eine Industrial-Internet-of-Things-Plattform können die Daten von anderen Forschungseinrichtungen und Unternehmen für Forschungszwecke genutzt werden, beispielsweise zur Modellierung und Simulation der Produktion oder zur intelligenten Prozesssteuerung durch maschinelles Lernen. Gleichzeitig können die Informationen an externe Partner weitergegeben werden, was eine schnellere Reaktion sowohl auf industrielle Anforderungen als auch auf neue Erkenntnisse der Forschung ermöglicht.

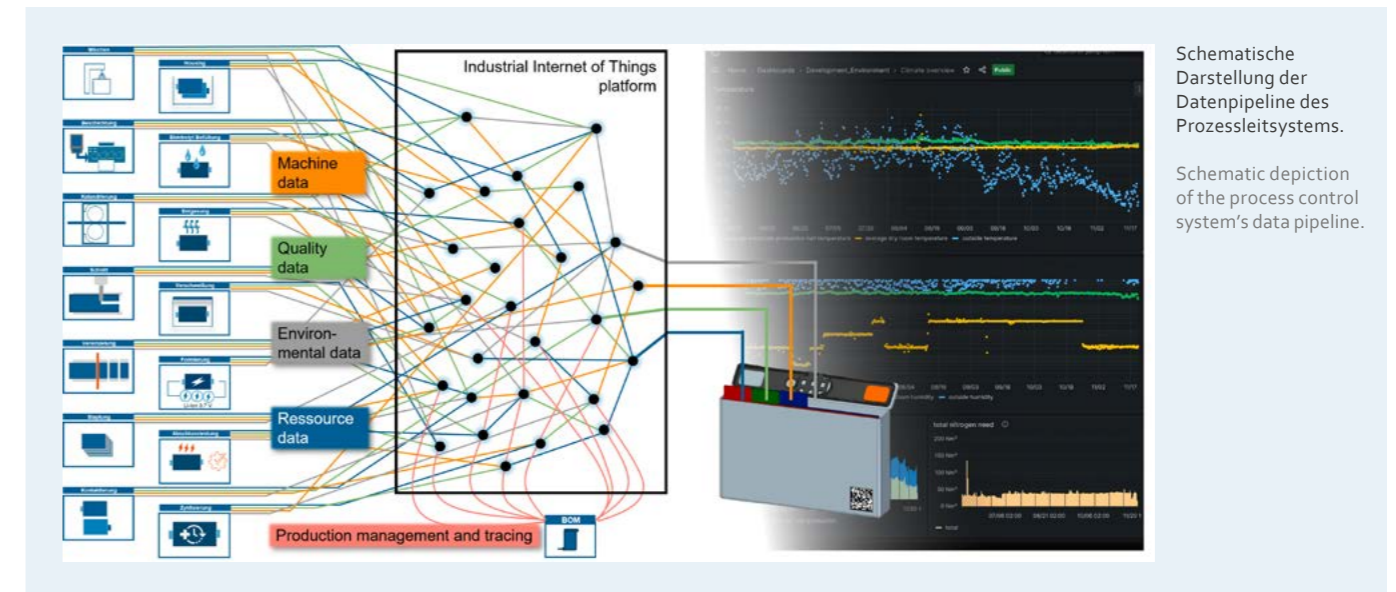
Mit der Entwicklung einer digitalisierten Batterieproduktion baut das ZSW eine Brücke von der prototypischen Demonstration bzw. Kleinserienfertigung hin zur Serientauglichkeit und Massenfertigung. Die KI-gestützte Produktionsforschung bildet dabei die Schlüsseltechnologie, die den Aufbau heimischer Produktionskapazitäten vorantreibt und die Unabhängigkeit von asiatischen Herstellern stärkt – ein entscheidender Faktor angesichts der stetig wachsenden Batterienachfrage.

BATTERIES ISSUED WITH DIGITAL PRODUCT PASSPORTS

From 2027, the European Green Deal will require that batteries are accompanied with digital product passports, providing transparent information about their quality and environmental impacts. To support this, ECP has introduced a process control system that records, structures and centralises all relevant data during production.

This process control system also facilitates the digitalisation of all cell production processes. An Industrial Internet of Things (IIoT) platform makes it possible to use data from other research institutes and companies for research purposes, such as for modelling and simulation of production processes, or for intelligent process control with machine learning. At the same time, information can also be shared with external partners, enabling them to respond more swiftly to industry requirements and new research findings.

By developing a digitalised battery manufacturing process, the ZSW has thrown a bridge from prototype demonstrators and small-series manufacturing to series readiness and mass production. In this context, AI-assisted production research represents a key technology, advancing the establishment of domestic production capacity and bolstering independence from Asian manufacturers – which, given the ever-rising demand for batteries, is a decisive factor.



Dr. David Becker-Koch
david.becker-koch@zsw-bw.de
+49 731 9530-712

Akkumulatoren (ECA)

Accumulators (ECA)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das Fachgebiet ECA betreibt am ZSW ein Batterietestfeld und untersucht elektrochemische Zellen, Module und Batterien bis 1500 V und 360 kW. Die Charakterisierung der elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie die Untersuchung des Verhaltens im Fehlerfall stehen im Mittelpunkt der Arbeiten. Die betrachteten Einsatzbereiche der Batterien umfassen die mobile und stationäre Energiespeicherung, insbesondere den Einsatz in elektrifizierten Antriebssträngen von Fahrzeugen – ob zu Land oder zu Wasser – oder für die Luftfahrt. Untersucht werden vorwiegend Lithium-Ionen-Zellen und -Systeme, aber auch Natrium-Ionen- und Lithium All-Solid-State-Zellen. In den Teams für elektrische Tests werden Zellen, Module und Systeme beispielsweise auf Funktionalität geprüft, deren Leistungsfähigkeit vermessen und die zu erwartende Lebensdauer bestimmt. Mittels zerstörender Tests werden im Team Safety Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen beurteilt. Hierzu betreibt das Fachgebiet ECA drei Sicherheitstestbunker inklusive einer mehrstufigen Abgasreinigung. Herzstück des Teams Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Simulation von Zellen und Batteriesystemen inklusive Algorithmen für den Batteriezustand und das Batteriemangement. Erforscht werden zudem die optimale Laderegelung unter Schnellladebedingungen auch mittels high precision coulombmetry (HPC), der Einfluss von Rippelströmen sowie von mechanischen Kompressionskräften auf die Performance, die zu erwartende Lebensdauer und die Sicherheit.



Dr. Olaf Böse
Head of Department
olaf.boese@zsw-bw.de
+49 731 9530-551



»Der sich verschärfende internationale Wettbewerb in der Automobilindustrie erfordert genaue Beobachtung. Das ZSW unterstützt die deutschen und europäischen OEM mit exakten und verlässlichen Untersuchungen zu elektrochemischen Zellen, Modulen und Energiespeichern.«

»The intensifying international competition in the automotive industry must be closely monitored. The ZSW supports German and European OEMs with precise and reliable examinations of electrochemical cells, modules and energy storage systems.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

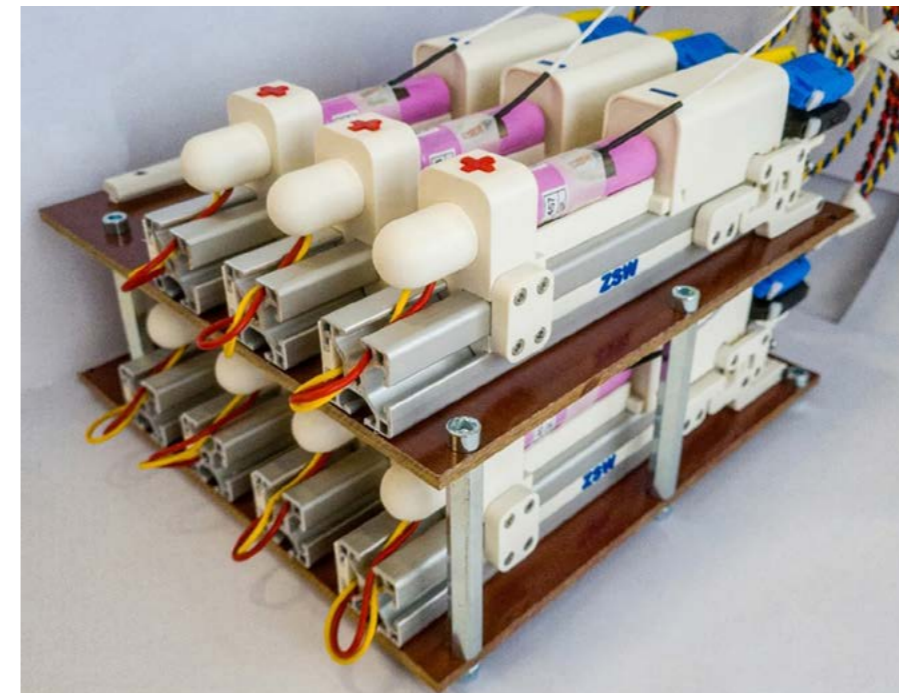
The ECA department operates a battery test site at the ZSW and conducts research into electrochemical cells, modules and batteries up to 1500 V and 360 kW. Its work focuses on the specification of the electrical, thermal and mechanical properties under different operating conditions and investigating behaviour and response in cases of failure. It examines battery applications for mobile and stationary energy storage, especially in electrified power trains in vehicles – whether on land, on water or for aviation. Its research is primarily devoted to lithium-ion cells and systems but also covers sodium-ion cells and lithium all-solid-state cells. The electrical testing teams carry out tests on cells, modules and systems, which includes examining their functionality, measuring their performance and calculating their expected service life. The safety team uses destructive tests to assess the potential dangers posed by accumulators in case of extreme damage. There are three safety test bunkers available for this purpose, including a multi-stage exhaust gas cleaning system. The battery system technology team is primarily concerned with the thermal and electrical simulation of cells and battery systems, including algorithms for battery condition and battery management. Other areas of research include optimal charge management during rapid charging, including by means of high-precision coulometry (HPC), along with the influence of ripple currents and mechanical compression forces on performance, expected service life and safety.

NEU ENTWICKELTER BATTERIE-ZELLHALTER MIT SCHNELLER, SICHERER UND FLEXIBLER HANDHABUNG

Der Betrieb eines großen Batterietestzentrums erfordert u. a. den schnellen und zuverlässigen Umbau von Testaufbauten. Hierzu gehört im Bereich von Zelltests auch die elektrische Anbindung von Rundzellen in Standardgrößen wie 18650 und 21700. Da am ZSW dafür eine große Anzahl an Zellhaltern benötigt wird, hat ECA Zellhalter für die genannten Formate nach deren eigenen Vorstellungen und technischen Anforderungen selbst entwickelt und hergestellt. Die entwickelten Zellhalter bieten eine schnelle und sichere Fixierung von Rundzellen der Formate 18650 und 21700. Zellhalter für die 46000-Zellformate befinden sich im Entwicklungsprozess. Das modulare Systemdesign erlaubt, mehrere Zellhalter zu einem kompakten Testaufbau zu kombinieren. Durch ihre Stapelbarkeit können die Zellhalter platzsparend eingesetzt werden und benötigen weniger kostbaren Testraum. Darüber hinaus sind die Zellhalter mit eindeutiger Polarität gekennzeichnet, so dass eine Verpolung der Zellen beim schnellen Zellwechsel praktisch ausgeschlossen werden kann. Die Zellhalter erlauben Dauerströme bis 10,5 A bei Temperaturen bis 70 °C. Hochstromfähige Zelltester für Dauerströme bis 50 A sind optional verfügbar. Das ZSW bietet die Zellhalter auch externen Interessenten an.

NEWLY DEVELOPED BATTERY CELL HOLDER FOR SWIFT, SAFE AND FLEXIBLE HANDLING

An important part of operating a large-scale battery test centre is rapid and reliable conversion of test set-ups. In cell testing, this includes establishing electrical connections for cylindrical cells in standard sizes, such as 18650-type and 21700-type cells. Given the high number of cell holders required at the ZSW, ECA developed and produced cell holders for the aforementioned formats in line with their own vision and technical requirements. The resulting cell holders permit swift and secure fixation of cylindrical 18650-type and 21700-type cells. Cell holders for 46000-type cells are currently under development. The modular system design makes it possible to combine multiple cell holders in a compact test set-up. The cell holders are stackable, which facilitates space-saving test set-ups and takes up less of the precious testing area. In addition, polarities are clearly marked on the cell holders, which practically eliminates the risk of accidental polarity reversal during quick cell changeover. The cell holders can withstand constant currents up to 10.5 A at temperatures up to 70 °C. High-current cell testers for persistent currents up to 50 A are also optionally available. The ZSW also offers these cell holders to interested external partners.



Gestapelte Zellhalter aus der ZSW-Eigenfertigung.

Stacked cell holders – made in-house at the ZSW.

Mehr Info
More details



Dr. Olaf Böse
Head of Department
olaf.boese@zsw-bw.de
+49 731 9530-551

Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)

Renewable Fuels and Processes (REG)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das Fachgebiet REG entwickelt anwendungsnahe Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff und regenerativen Kraftstoffen von Power-to-X (eFuels). Im Bereich Circular Economy werden Kreislaufprozesse zur Phosphor-Rückgewinnung und rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen erforscht.

Im REG-Technikum entstehen anwendungsnahe Technologiebausteine für die Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Folgeprodukten, die im technischen Maßstab umgesetzt und erprobt werden. Der Schwerpunkt im Bereich Wasserstoff liegt auf serientauglichen und skalierbaren Materialien sowie Fertigungsmethoden für alkalische Elektrolyseure. Es stehen eigene Elektrolysestack- und Systemtechnologien bis in den MW-Maßstab zur Verfügung. Bereits realisiert und betrieben wurden zwei CE-zertifizierte Elektrolyse-Komplettsysteme mit jeweils 1 MW_{eI} Anschlussleistung.

Für industrielle Anwender werden vielfältige Testmöglichkeiten angeboten, die von Materialuntersuchungen bis hin zu Multi-MW-Stacks reichen. Insgesamt stehen rund 15 Prüfstände (ElyLab) zur Verfügung. Zur Herstellung von eFuels werden Verfahren zur effizienten regenerativen CO₂-Bereitstellung aus der Luft (Direct Air Capture) und aus biogenen Reststoffen entwickelt. Der Betrieb einer Forschungsanlage mit einer jährlichen Abscheidkapazität von 100 Tonnen CO₂ macht diese zu einer der größten DAC-Anlagen Deutschlands.

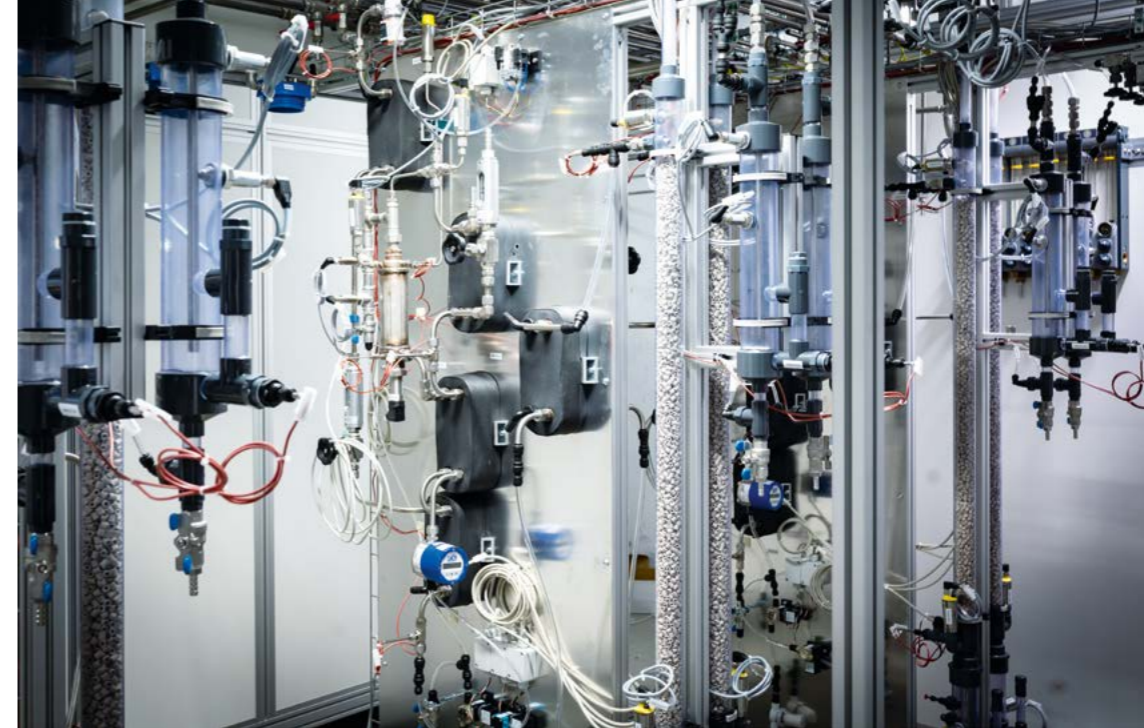
Industriekunden werden vom Komponentenengineering über die Inbetriebnahme kommerzieller Komplettanlagen bis hin zum Technologiemonitoring beraten. Ergänzend zu den Elektrolyse- und Power-to-X-Aktivitäten werden innovative Verfahren zum Recycling von Phosphor sowie zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen entwickelt.

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The REG department develops application-oriented technologies for the production of hydrogen and renewable fuels in the content of Power-to-X (e-fuels). In relation to the circular economy, the department researches circular processes of phosphorus recovery and feedstock recycling of plastic waste.

At the REG pilot plant, technology modules for applications related to the production of hydrogen and synthetic derivatives are developed, implemented and tested on an industrial scale. The focus in relation to hydrogen is developing reproducible and scalable materials and manufacturing methods for alkaline electrolyzers. The ZSW has its own MW-scale electrolysis stack and electrolysis system technologies and has already built and put into operation two CE-certified, fully integrated electrolysis systems, each with a connected load of 1 MW_{eI}.

It offers a variety of testing services for industrial customers, ranging from material analyses through to multi-MW stacks. In total, the department has around 15 test benches (ElyLab) at its disposal. The department is developing processes to ensure efficient, regenerative CO₂ provision via direct air capture and from biogenic residues to support e-fuel production. By operating a research plant with an annual separation capacity of 100 tonnes of CO₂, this is one of the largest DAC facilities in Germany. Industrial customers can seek advice on aspects ranging from component engineering right through to the commissioning of turnkey commercial systems and technology monitoring. In addition to its work on electrolysis and power-to-X systems, the department is developing innovative processes for the recycling of phosphorus and the feedstock recycling of plastic waste.



DACfit Testumgebung.

The DACfit test environment.

DAC-TESTINFRASTRUKTUR »DACFIT«

Mit DACfit entsteht ein Testlabor, das Direct-Air-Capture-Technologien (DAC-Technologien) erstmals unter realitätsnahen, weltweit variierenden Klimabedingungen vergleichbar macht. Während der Ausbau erneuerbarer Energien einerseits viele neue Standorte für großtechnische DAC-Anlagen eröffnet, sind damit andererseits oftmals erhebliche Anforderungen an die DAC-Technologien verbunden, die sehr sensibel auf Temperatur- und Feuchteschwankungen reagieren. Diese Faktoren entscheiden maßgeblich über Effizienz, Energiebedarf und letztlich Wirtschaftlichkeit.

DACfit schafft dafür eine einzigartige Forschungsumgebung: Mithilfe einer hochflexiblen Luftvorkonditionierung kann nahezu jede globale Klimasituation nachgebildet werden. Ergänzt wird sie durch modulare Testreaktoren für vorwiegend flüssige, aber auch feststoffgebundene CO₂-Sorbentien. So lassen sich Prozesse erstmals systematisch unter definierten Umweltprofilen testen – vom trockenen Wüstenklima bis zur tropischen Feuchte. Die gewonnenen Daten ermöglichen eine präzisere Prozessauslegung, liefern Hinweise auf standortspezifische Grenzen und schaffen eine belastbare Basis für Technologiebenchmarks. Parallel analysiert das ZSW-Fachgebiet Systemanalyse globale Standorte und deren Potenzial. Damit legt DACfit den Grundstein für fundierte Entscheidungen bei der zukünftigen Implementierung von DAC-Systemen weltweit.

DAC TEST INFRASTRUCTURE AT »DACFIT«

»DACfit« is a test laboratory that facilitates, for the first time, the comparison of direct air capture (DAC) technologies under realistic, globally varying climatic conditions. While the expansion of renewable energy generation opens up numerous new locations for large-scale DAC facilities, DAC technologies are often associated with significant requirements due to their high sensitivity to temperature and humidity fluctuations. These factors have a determining influence on the efficiency, energy requirements and, ultimately, the economic viability of such facilities.

DACfit provides a unique research environment, including highly flexible air pre-conditioning that permits researchers to replicate almost all climatic situations worldwide. It is supplemented with modular test reactors for primarily liquid but also solid CO₂ sorbents. This facilitates systematic process testing for the first time under defined environmental profiles – from dry desert climates to tropical humidity. The data collected permits more precise process design, provides indications of site-specific limits and builds a robust basis for technology benchmarking. In parallel with this, the ZSW's Systems Analysis department analyses sites around the world and scrutinises their potential. Consequently, DACfit lays the foundations for sound decisions in the future implementation of DAC systems.



Dr. Marc-Simon Löffler
Head of Department
marc-simon.loeffler@zsw-bw.de
+49 711 7870-233



»Mit unseren Eigenentwicklungen und Testmöglichkeiten unterstützen wir die Industrie beim Markthochlauf der Zukunftstechnologien Elektrolyse und eFuels.«

»Through our in-house developments and testing capabilities, we're supporting industry in the market ramp-up of electrolysis and e-fuels as key future technologies.«



Dr. Raphael Vollmer
raphael.vollmer@zsw-bw.de
+49 711 7870-171



Entwicklung eines Designs für einen generischen AEM-Elektrolysestack.

Development of a design for a generic AEM electrolysis stack.

ENTWICKLUNG & DESIGN DES GENERISCHEN AEM-ELEKTROLYSESTACKS

Das ZSW und das Holst Centre in der niederländischen Region Noord-Brabant arbeiten gemeinsam an innovativen Ansätzen zum Design und zur Produktion von kosteneffizienten und großskalierbaren AEM (Anion Exchange Membrane)-Elektrolyseuren. Im Projekt »genAEMStack« werden neue Komponenten und Fertigungsverfahren erprobt.

Ziel ist ein generischer Elektrolysestack mit hohem europäischem Mehrwert, der Unternehmen aus den beiden Regionen als Entwicklungsplattform für eigene Produktentwicklungen und dem Aufbau von regionalen Wertschöpfungsketten dienen soll. Das Wirtschaftsministerium des Landes Baden-Württemberg fördert das ZSW aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) mit rund 1,6 Mio. Euro. Das Projekt hat eine Laufzeit von 2,5 Jahren.

Für den kommerziellen Erfolg der noch jungen AEM-Technologie müssen neben effizienten und langlebigen Komponenten auch serientaugliche, skalierbare und kostengünstige Designs und Produktionstechnologien entwickelt werden. Das ZSW konzentriert sich in dem Projekt auf das Design und die Herstellung eines serientauglichen, skalierbaren AEM-Stacks. Die neu entwickelten AEM-Komponenten und Stackprototypen werden in Prüfständen des ElyLab-Testzentrums am ZSW in Stuttgart auf Herz und Nieren geprüft. Das Holst Centre konzentriert sich auf Kostenstrukturanalysen und auf die Entwicklung verbesserter poröser Transportschichten und Beschichtungen.

DEVELOPMENT & DESIGN OF THE GENERIC AEM ELECTROLYSIS STACK

The ZSW and the Holst Centre in the Dutch region of Noord-Brabant are working together on innovative approaches for the design and production of cost-efficient and scalable AEM electrolyzers with the aim of promoting European production of green hydrogen. In the »genAEMStack« project, the partners are testing new components and production processes.

The aim is to produce a generic electrolysis stack that would offer significant value for Europe and serve as a development platform for companies in both regions to drive their own product developments and establish regional value chains. The Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs has awarded the ZSW roughly €1.6 million from the European Fund for Regional Development (EFRE) to support the endeavour. The project has a term of 2.5 years.

If AEM technology – which is still in its infancy – is to achieve commercial success, it will require efficient and durable components as well as series-ready, scalable and cost-efficient designs and production technologies. In this project, the ZSW is focusing on designing and manufacturing a series-ready, scalable AEM stack. The newly developed AEM components and stack prototypes are being put through their paces in test rigs at the ElyLab test center at ZSW in Stuttgart. The Holst Centre focuses on cost structure analyses and on the development of improved porous transport layers and coatings.

FERTIGUNGSOPTIMIERTER ELEKTROLYSESTACK

Im Reallabor der Energiewende »H2-Wyhlen« in Grenzach-Wyhlen wird der dortige H₂-Produktionsstandort mit Fördermitteln des Bundeswirtschaftsministeriums auf eine Elektrolyseleistung von ca. 6 MW ausgebaut.

Für günstigen grünen Wasserstoff müssen Elektrolyseure effizienter und kostengünstiger werden. Schwerpunkt des ZSW in diesem Projekt ist es, den Einsatz innovativer Materialien und serienfähiger automatisierter Fertigungsverfahren zu erforschen, um dieses Ziel realisieren zu können. Am ZSW wurde im Rahmen des Projekts ein fertigungsoptimierter, serientauglicher Stackprototyp in der 0,5 MW_e-Klasse entwickelt (AEL, 30 bar). Dieser vereint u. a. Spritzguss-Zellrahmen mit Fertigungszeiten < 100 s, ein Elektrodendesign mit Zero-Gap-Konfiguration und edelmetallfreie Beschichtungen aus einer industriellen Galvanikanlage. So konnten die Kosten im Vergleich zur ZSW-Basistechnologie beim Projektstart um ca. 30 % reduziert werden. Für eine Kleinserie sind so bereits Herstellungskosten < 400 €/kW_e erzielbar. Der Prototyp befindet sich in der Validierungsphase und hat bereits die ersten 2.000 Betriebsstunden erfolgreich absolviert.

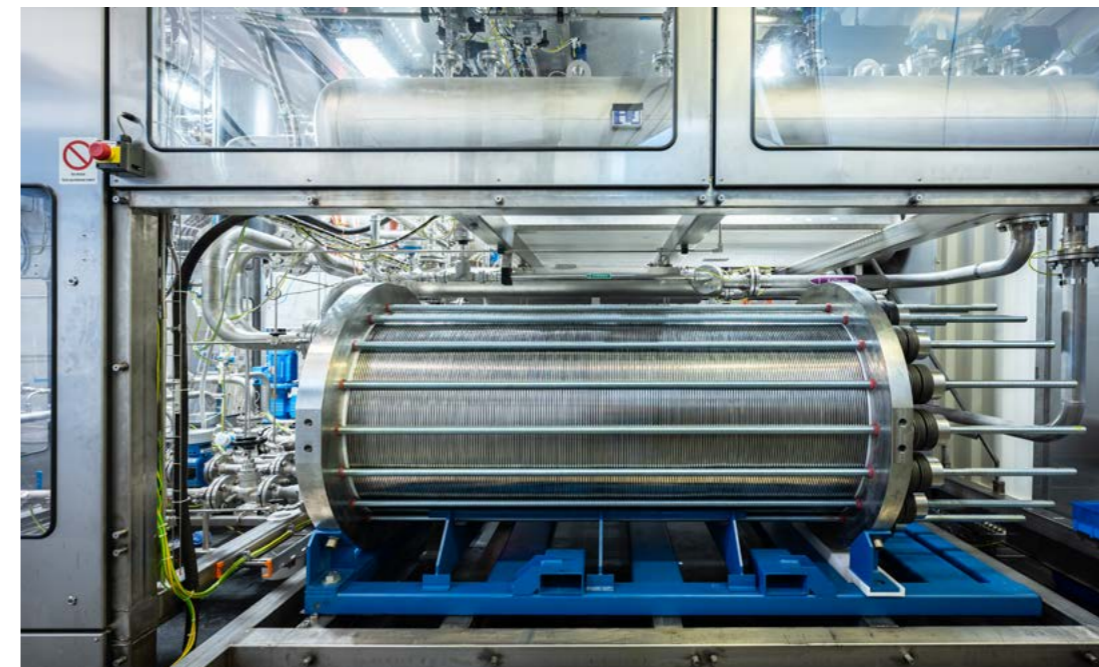
Mittelfristig sind mit diesem Stackdesign Kosten < 250 €/kW_e darstellbar. Weitere Senkungspotenziale bestehen vor allem noch bei Zellrahmenmaterialien und günstigeren Herstellungsprozessen für die Elektrodenbeschichtung.

PRODUCTION-OPTIMISED ELECTROLYSIS STACK

At »H2-Wyhlen«, a living lab in Grenzach-Wyhlen dedicated to energy transition issues, existing H₂ production infrastructure is being upgraded with funding from the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWE) to create total electrolysis capacity of 6 MW.

If the price of green hydrogen is to fall, electrolyzers must become more efficient and cost-effective. In an effort to make this a reality, the ZSW's research focus in this project is the use of innovative materials and series-ready, automated production techniques. As part of the project, a production-optimised, series-ready stack prototype in the 0.5 MW_e class has been developed at the ZSW (AEL, 30 bar). Its features include injection moulded cell frames with production times of < 100 seconds, an electrode design with zero-gap configuration and non-precious coatings from an industrial electroplating system. These innovations have reduced production costs by 30% compared to the ZSW's baseline technology at the start of the project. Consequently, manufacturing costs of < €400/kW_e are now feasible for small-batch series. The prototype is currently in the validation phase and has successfully logged 2,000 operating hours.

Over the medium term, it is conceivable that the costs of this stack design could fall to < €250/kW_e. Further cost-cutting potential lies above all in the cell frame materials and more cost-efficient manufacturing processes for the electrode coating.



Fertigungsoptimierter Elektrolysestack in der 500 kW-Leistungsklasse.

A production-optimised electrolysis stack in the 500 kW class.



Dr. Marc-Simon Löffler
Head of Department
marc-simon.loeffler@zsw-bw.de
+49 711 7870-233



Dr. Ben Haugk
ben.haugk@zsw-bw.de
+49 711 7870-165

Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das Fachgebiet ECG entwickelt Technologien zur effizienten und kostengünstigen saisonalen Energiespeicherung. Im Fokus stehen wiederaufladbare Batteriesysteme mit wässrigen Elektrolyten sowie Elektrodenmaterialien für PEM-Brennstoffzellen und PEM-Elektrolyseure zur Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff. Angesichts der Diskussion um per- und polyfluorierte Verbindungen richtet sich ein wesentlicher Teil der Forschung auf leistungsfähige fluorfreie Polymerelektrolyte. Ein weiterer Aspekt ist das Korrosionsverhalten metallischer Komponenten in Brennstoffzellen und Elektrolyseuren, da es die Leistungsfähigkeit, Lebensdauer und Systemkosten maßgeblich beeinflusst. Zur Charakterisierung werden klassische elektrochemische Verfahren (Lade-/Entladekurven, Voltammetrie, Impedanzspektroskopie) sowie fortgeschrittene bildgebende Methoden (Röntgen-, Synchrotron- und Neutronentomographie in operando, hochauflösende Elektronen- und Rasterkraftmikroskopie) eingesetzt. Dank langjähriger Erfahrung und umfassender Infrastruktur ist das Fachgebiet ECG in der Lage, neue Materialkonzepte und Herstellverfahren rasch zu evaluieren und experimentell zu demonstrieren. Ziel ist immer die Entwicklung umweltfreundlicher, leistungsstarker Energiespeicher- und Wasserstoffsysteme auf der Basis recyclingfähiger und großvolumig verfügbarer Rohstoffe.

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The ECG department develops technologies to promote efficient and cost-effective seasonal energy storage. It focuses on rechargeable batteries with aqueous electrolytes as well as electrodes for polymer fuel cell (PEM) electrolyzers and PEM fuel cells for the production and use of hydrogen. Given the ongoing public debate regarding a ban on perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFAS), fluorine-free polymer electrolytes account for a significant share of the department's research. The corrosion behaviour of metallic materials in fuel cells and electrolyzers is another key research topic, as it has a significant impact on the performance, service life and system costs. The ECG department performs characterisation work using conventional electrochemical methods (charge-discharge curves, voltammetry and impedance spectroscopy) alongside advanced imaging techniques (X-ray, synchrotron and neutron tomography in operando, high-resolution electron microscopy and atomic force microscopy). Thanks to its researchers' years of experience and extensive infrastructure, the ECG department is capable of swiftly evaluating new material concepts and manufacturing processes and demonstrating them in experiments. Its constant aim is to develop environmentally friendly, high-performance energy storage and hydrogen systems built around recyclable and abundant raw materials.



»Wir erforschen und entwickeln grundlegend neue Materialien und Komponenten für Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Hochleistungspeicher und Metall-Luft-Zellen.«

»We research and develop fundamentally new materials and components for fuel cells, electrolyzers, high-performance storage systems and metal-air cells.«



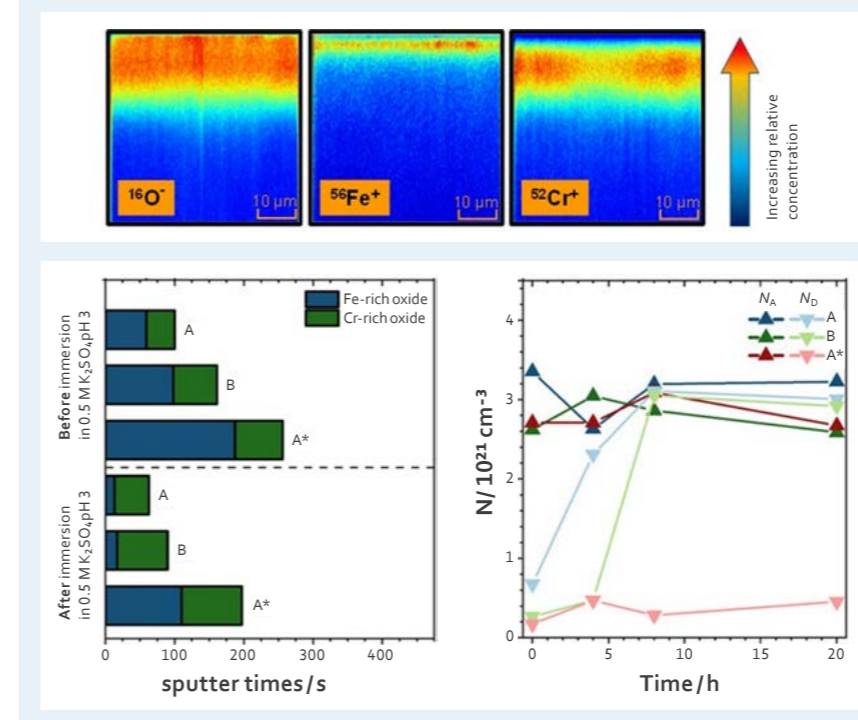
Dr. Ludwig Jörissen
Head of Department
ludwig.joerissen@zsw-bw.de
+49 731 9530-605

DIE PASSIVSCHICHT AUF ROSTFREIEM STAHL

Die geringen Kosten und die relativ einfache Herstellung von 316L-Edelstahl mit verschiedenen Flow-Field-Designs machen dieses Material ideal für Bipolarplatten in Brennstoffzellen- und Elektrolyseurstacks auf Protonenaustauschmembran-Basis (PEM). Die Korrosionsbeständigkeit von rostfreiem Stahl beruht auf einer ultradünnen passiven Oxidschicht mit einer Dicke von etwa 3 nm. Um die Eigenschaften und die Merkmale dieser Passivschicht sowie deren Veränderungen unter verschiedenen experimentellen Bedingungen zu bestimmen, ist ein hoher Grad an Genauigkeit erforderlich. Durch den Einsatz fortgeschrittener physikalisch-chemischer Charakterisierungstechniken wie Flugzeit-Sekundärionen-Massenspektrometrie (ToF-SIMS) und der elektrochemischen Impedanzspektroskopie lässt sich die duplexe Struktur der Passivschicht genau auflösen: diese besteht aus einer eisenreichen Oxidschicht über einer chromreichen Oxidschicht (siehe Abbildungen unten). Veränderungen, die durch unterschiedliche Umgebungsbedingungen, verschiedene Materialquellen oder aus Schritten im Fertigungsprozess entstehen, können in Bezug auf die Dicke der Passivschicht, ihre chemische Zusammensetzung und ihre halbleitenden Eigenschaften quantitativ bewertet werden. Diese Arbeit liefert ein Beispiel dafür, wie detaillierte Grundlagenuntersuchungen direkt zur Optimierung industrieller Herstellungsprozesse beitragen können.

THE PASSIVE LAYER ON STAINLESS STEEL

The low costs and relatively simple production process of 316L stainless steel with different flow-field designs makes the material ideally suited to bipolar plates in proton exchange membrane (PEM)-based fuel cell and electrolysis stacks. Stainless steel owes its corrosion resistance to an ultra-thin passive oxide layer that measures around 3 nm thick. Determining the characteristics and features of this passive layer, and how it changes in different experimental conditions, requires absolute precision. Advanced physicochemical characterisation techniques – such as time-of-flight secondary ion mass spectrometry (ToF-SIMS) and electrochemical impedance spectroscopy – provide precise insights into the passive layer: its duplex structure comprises an iron-rich oxide layer, positioned on top of a chrome-rich oxide layer (see figures below). Changes brought about by different environmental conditions, different material sources and different production steps can be quantitatively examined based on the passive layer's thickness, its chemical composition and its semiconductive properties. This work serves as an example of how detailed basic research can directly contribute to optimisation of industrial manufacturing processes.



ToF-SIMS-Bildgebung, die die duplexe Natur der Passivschicht auf 316L-Edelstahl sichtbar macht.

ToF-SIMS imaging, visualising the duplex nature of the passive layer in 316L stainless steel.

Links: Relative Veränderungen der Dicke der Passivschicht nach der Exposition gegenüber einem Elektrolyten für verschiedene Stahlzulieferer.

TLeft: Relative changes in passive layer thickness following exposure to an electrolyte for different steel suppliers.

Rechts: Zeitliche Entwicklung der Donor- und Akzeptor-Ladungsträgerdichten in der Passivschicht während der Exposition gegenüber einem Elektrolyten.

Right: Development in donor and acceptor charge carrier densities in the passive layer over time during exposure to an electrolyte.



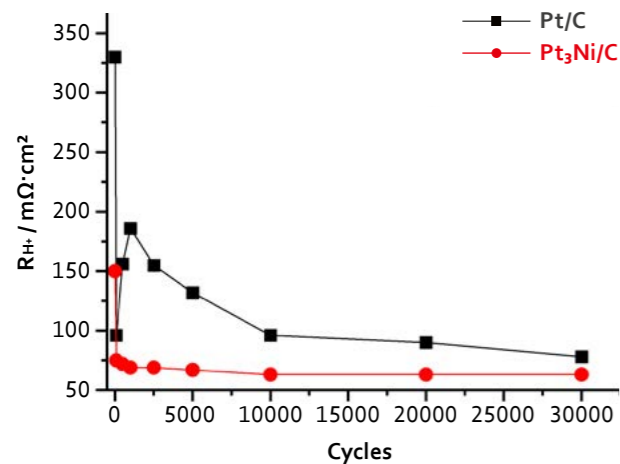
Dr. Sylvain Brimaud
sylvain.brimaud@zsw-bw.de
+49 731 9530-615

ALTERUNG VON KATHODEN IN PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Die Verringerung der Degradationsrate von Wasserstoff-PEM-Brennstoffzellen ist ein entscheidender Faktor, um die Kosten zu senken und den Erfolg dieser Technologie in zukünftig großtechnischen Anwendungen zu sichern. Degradationsprozesse treten auf mehreren Ebenen innerhalb der Brennstoffzelle auf, darunter auch beim edelmetallbasierten Katalysatormaterial der Kathode. Mit einem speziell entwickelten beschleunigten Alterungstest zeigt sich, dass ein bimetallischer Platin-Nickel-Katalysator (PtNi/C) an der Kathode schneller an Leistung verliert als ein reiner Platin-Katalysator (Pt/C). Die In-situ-Charakterisierung der Kathode zeigt, dass eine moderate Nickelkontamination des Ionomers die protonische Leitfähigkeit erhöht und damit die Zelleistung zunächst verbessert. Dieser Vorteil wird jedoch durch erhebliche negative Auswirkungen auf den Sauerstofftransport zu den katalytischen Zentren aufgehoben. Dieses differenzierte Verständnis der Auswirkungen von Ni-Kontamination trägt dazu bei, widersprüchliche Berichte in der wissenschaftlichen Literatur zu erklären. Gleichzeitig liefert es einen Referenzpunkt, kombiniert mehrere experimentelle Methoden und bietet ein Rahmenwerk zur Bewertung des Fortschritts bei der Verbesserung der Stabilität von Katalysatormaterialien.

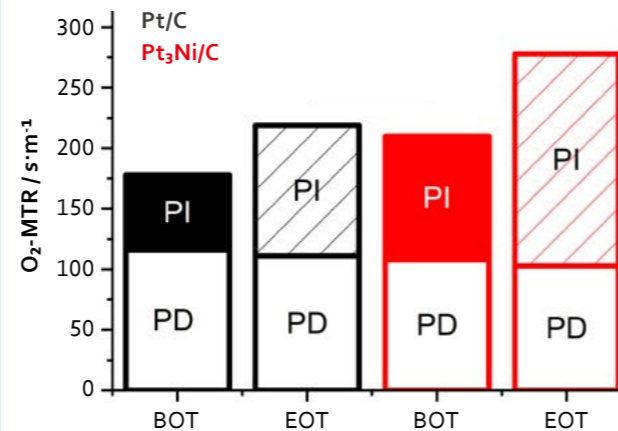
AGEING OF CATHODES IN PEM FUEL CELLS

Reducing the degradation rate of hydrogen proton-exchange-membrane fuel cell performance is one of the key cost levers needed to support the success of this technology in future large-scale applications. Degradation processes occur at multiple levels within fuel cells, one of which involves the noble-metal-supported catalyst material used at the cathode. Using a specifically designed accelerated degradation test, it was observed that a bimetallic platinum-nickel catalyst (PtNi/C) at the cathode loses performance faster than a pure platinum catalyst (Pt/C). In situ characterisation of the cathode reveals that moderate Ni contamination of the ionomer enhances protonic conductivity and thus initially improves cell performance. However, this benefit is offset by significant detrimental effects on oxygen transport to the catalytic sites. This nuanced understanding of the consequences of Ni contamination helps reconcile conflicting reports in the scientific literature. It provides a benchmark, with a framework combining multiple experimental methods, for assessing progress in improving catalyst material stability.



Entwicklung des Widerstands gegen protonische Leitung in der Katalysatorschicht der Kathode während des beschleunigten Alterungstests.

Evolution of the resistance against protonic conduction in the cathode catalyst layer upon accelerated degradation test.



Veränderungen des Sauerstoff-Massentransportwiderstands an der Brennstoffzellenkathode nach dem beschleunigten Alterungstest.

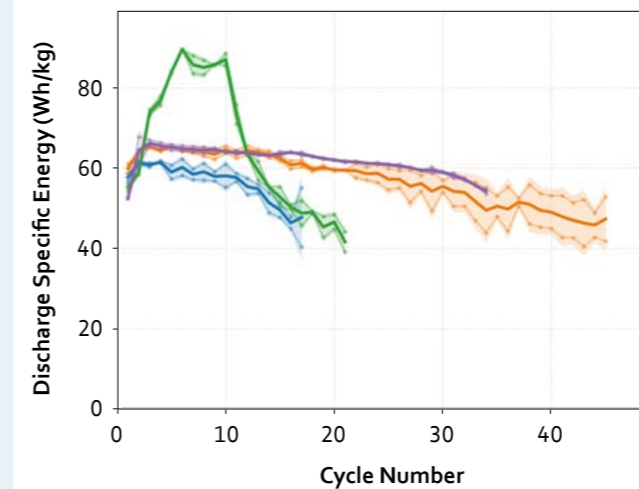
Changes in the oxygen mass transport resistance at the fuel cell cathode after accelerated degradation test.

WIEDERAUFLADBARE ALKALISCHE ZINK-MANGANOXID-BATTERIE (ZN-MNO₂)

Aufgrund der guten Materialverfügbarkeit, der moderaten Materialkosten von 15 bis 30 Euro pro Kilowattstunde und der Energiedichte von 400 Wattstunden pro Liter beziehungsweise 150 Wattstunden pro Kilogramm bieten wiederaufladbare alkalische Zn-MnO₂-Batterien (ZMB) eine vielversprechende Alternative zu Lithium-Ionen-Systemen für stationäre Anwendungen. Das ZSW konnte zeigen, dass die Manganoxid-Kathode (MnO₂) besonders stabil ist, wenn drei Faktoren kombiniert werden: neuartige Aktivmaterialien, ein innovatives Elektrodendesign und ein ionenselektiver Separator. Dies ermöglicht Stabilität über mehrere hundert Zyklen – selbst bei nahezu vollständiger Entladung (100 % DoD, Depth of Discharge) und Lade- sowie Entladeraten von 0,1 bis 0,5 C. Im Projekt ORRCABATT (»Optimales Design für wiederaufladbare alkalische Zink-Manganoxid-Batterien als flexibler Energiespeicher«), gefördert vom Bundesforschungsministerium, wurde die ZMB-Technologie erfolgreich in ein alkalistabiles, modulares, stapelbares und skalierbares Pouchzellenformat überführt (siehe Abbildung rechts); Elektrodenrezeptur, Elektrolyt und Testprotokolle werden derzeit weiter optimiert (siehe Abbildung links).

RECHARGEABLE ALKALINE ZINC-MANGANESE DIOXIDE (ZN-MNO₂) BATTERIES

Given the good material availability, reasonable material costs of €15–30 per kilowatt-hour and an energy density of 400 Wh per litre and 150 Wh per kilogram, rechargeable alkaline ZnMnO₂ batteries (ZMB) represent a promising alternative to lithium-ion systems for stationary applications. The ZSW has demonstrated that the manganese dioxide cathode (MnO₂) exhibits high stability when three factors are combined: advanced active materials, an innovative electrode design, and an ion-selective separator. This results in stable performance over several hundred charge–discharge cycles, even at near-complete depth of discharge (100% Do) and charge and discharge rates of 0.1 to 0.5 C. Within the ORRCABATT project (»Optimized design for rechargeable alkaline zinc–manganese dioxide batteries as a flexible energy storage system«), Funded by the German Federal Research Ministry, the ZMB technology was successfully transferred into an alkali-stable, modular, stackable and scalable pouch cell format (see figure right). The electrode formulation, electrolyte, and test protocols are currently being further optimised (see figure left).



Entladespezifische Energie in Abhängigkeit von der Zyklenzahl für verschiedene Elektrolytkonzentrationen (6 M, 10 M KOH) und Ladeprotokolle (CCCV, Pulsladung).

Discharge-specific energy as a function of cycle number for different electrolyte concentrations (6 M, 10 M KOH) and charging protocols (CCCV, pulse charging).



Die im ORRCABATT-Projekt entwickelte alkalistabile, modulare Zn-MnO₂-Pouchzelle.

The alkali-stable, modular Zn-MnO₂ pouch cell developed in the ORRCABATT project.



Dr. Sylvain Brimaud
sylvain.brimaud@zsw-bw.de
+49 731 9530-615



Dr. Emanuele Marini
emanuele.marini@zsw-bw.de
+49 731 9530-211

Brennstoffzellen Stacks (ECB)

Fuel Cell Stacks (ECB)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das Fachgebiet ECB ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Im Zentrum stehen die Konstruktion, Herstellung, Charakterisierung und Simulation von PEMFC-Stacks und -Komponenten im Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 100 kW_e. Weitere Kernkompetenzen liegen im Bau von Prototypen und auf der Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien. ECB optimiert Brennstoffzellen in Bezug auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Das umfasst u. a. das Verständnis von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Zudem entwickelt ECB manuelle und automatisierte Herstellertechniken für PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks. Hervorzuheben sind hierbei die Entwicklungsarbeiten zur Stackassemblierung im Rahmen der Forschungsfabrik HyFaB, darunter eine vollautomatische Zell-Assembliereinheit sowie eine Rolle-zu-Rolle-Anlage zur Herstellung von MEA-GDL-Einheiten. Brennstoffzellen können mittels Modellierung und Simulation der elektrochemischen Prozesse zügig optimiert und neue Ansätze etabliert werden. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt mit realitätsnahen Ex- und In-situ-Experimenten. Das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionslagen (GDL) und Gasverteilerstrukturen untersuchen ECB u. a. mittels einer μ -CT-Anlage. Damit können Strukturen von GDL auch im komprimierten Zustand einschließlich Wasserhaushalt abgebildet werden. Ergänzend stehen am ZSW vorhandene Analysetechniken zur Oberflächen- und Strukturcharakterisierung (z. B. FIB-SEM) sowie mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiografie und -tomografie zur Verfügung, deren Auflösungen zu den weltweit besten gehören.



Dr. Joachim Scholta
Head of Department
joachim.scholta@zsw-bw.de
+49 731 9530-206

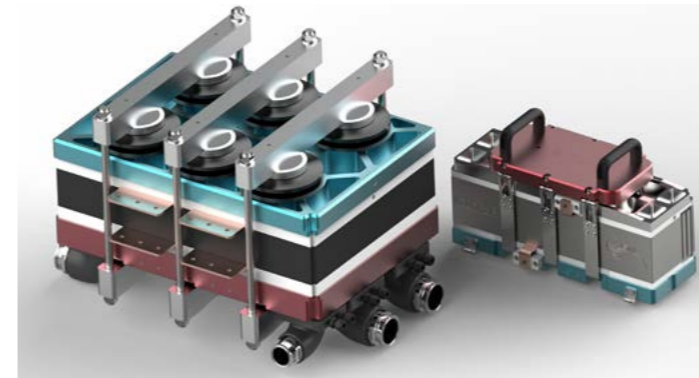


»Im Mittelpunkt unserer Arbeit steht die Optimierung von Brennstoffzellen mit all ihren Komponenten in Bezug auf Design, Fertigung, Leistung und Lebensdauer.«

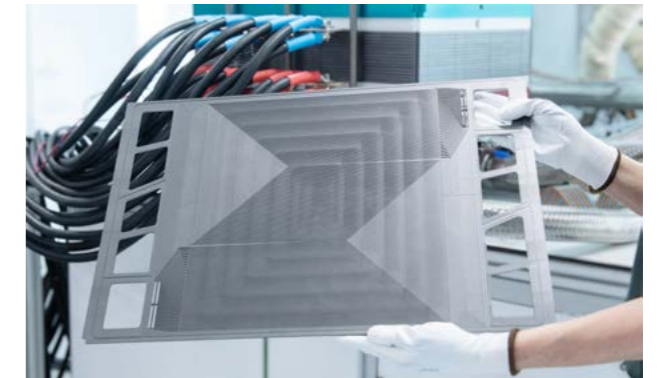
»Optimising the design, production, performance and service life of fuel cells and all their components lies at the heart of our work.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The ECB department specialises in the development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs). It focuses on the design, production, characterisation and simulation of PEMFC stacks and PEMFC components in a power range from just a few watts through to 100 kW_e. Other key specialisms include prototype construction and the development of manufacturing and testing technologies. ECB optimises fuel cells for enhanced performance, service life, efficiency and compactness. This includes understanding ageing processes and analysing faults. ECB also develops manual and automated manufacturing technologies for PEMFC components, cells and stacks. Particularly worthy of note is the development work on stack assembly at the HyFaB research factory, featuring a fully automatic cell assembly unit and a roll-to-roll system for the production of MEA-GDL units. Fuel cells can be quickly optimised and new approaches established through the modelling and simulation of electrochemical processes. The simulation results are verified using ex-situ and in-situ experiments under realistic conditions. The department examines water management within the gas diffusion layers (GDL) and gas distribution structures in various ways, including using a μ -CT system. This makes it possible to map the GDL structures, even under compression, including the water content. The ZSW also offers analytical methods for surface and structural characterisation (e.g. FIB-SEM) along with neutron and synchrotron radiography and tomography techniques developed with the Helmholtz-Zentrum Berlin, with resolutions ranking among the best in the world.



Kurzstack mit 15 Zellen im Größenvergleich zum generischen Stack mit 100 Zellen. Size comparison of the short stack with 15 cells and the generic stack with 100 cells.



Maritimer Brennstoffzellen-Demonstrator-Stack (15 Zellen) mit 1.300 cm² großen Bipolarplatten auf dem ZSW-Prüfstand. Maritime fuel cell demonstrator stack (15 cells) with 1,300 cm² bipolar plates on the ZSW test bench.

BRENNSTOFFZELLE MIT 1.300 CM² AKTIVFLÄCHE FÜR DIE SCHIFFFAHRT

Neben LKW und PKW ist die Schifffahrt ein potenzielles Anwendungsgebiet für Brennstoffzellen (BZ), wo Leistungen von mehreren Megawatt benötigt werden. Aktuelle Stackdesigns liefern deutlich weniger Leistung, weshalb viele kleine BZ-Stacks zu einem System verbunden werden müssen – auf Kosten der Leistungsdichte und mit höheren Stack- und Systemkosten. Am ZSW wurde daher ein großformatiger BZ-Stack mit 1.300 cm² aktiver Fläche und einer Auslegungleistung von 500 kW pro Stack für maritime Anwendungen entwickelt. Ausgangspunkt der Entwicklung war die Bipolarplatte (BPP), die sowohl für die elektrische Leitfähigkeit als auch für die gleichmäßige Verteilung der Reaktionsgase im Stack verantwortlich ist. Größenlimitierend sind die Abmaße der am Markt verfügbaren Rohgraphitplatten. Zur Maximierung der aktiven Fläche wurden die medienführenden Strukturen in CFD-Simulationen optimiert. Besonders die Kühlmittelverteilung erwies sich als entscheidend, um die Performance der derart großen Aktivfläche sicherzustellen. Nach mehreren Iterationsschleifen konnte eine Bipolarplatte mit über 1.300 cm² aktiver Fläche realisiert werden (siehe Abbildung oben rechts). Zur Sicherung von Dichtigkeit und elektrischer Kontaktierung zwischen BPP und Gasdiffusionslage müssen die im Stack gestapelten BPP mit rund 150 kN gespannt werden. Dazu wurde ein System aus Tellerfedern, Gewindestangen und Endplatten eingesetzt, das mittels FEM-Simulationen optimiert wurde. Abschließend wurde ein Demonstrator-Stack mit 15 Zellen aufgebaut und hausintern getestet, wobei eine Stackleistung von 25 Kilowatt gezeigt wurde, was einer Leistung von 500 Kilowatt bei 300 Zellen entspricht.

FUEL CELL FOR THE SHIPPING INDUSTRY WITH 1300 CM² ACTIVE AREA

In addition to cars and trucks, shipping presents another potential field of application for fuel cells (FCs), with multi-megawatt capacities required. Yet, as current stack designs deliver far lower output, numerous small-scale FC stacks have to be combined in a single system – at the loss of power density and with increased stack and system costs. With this in mind, a large-scale FC stack for maritime applications has been developed at the ZSW, featuring an active area of 1,300 cm² and a design output of 500 kW per stack. The starting point for this development was the bipolar plate (BPP), which is responsible both for electrical conductivity and even distribution of reaction gases within the stack. The dimensions of raw graphite plates available on the market present a size-limiting factor. The medium-conducting structures were optimised in CFD simulations to maximise the active area. The distribution of refrigerant proved particularly decisive in maintaining performance with such a large active area. After several iterations, the development team produced a bipolar plate with an active area in excess of 1,300 cm². The BPP in the stack must be tensioned to around 150 kN to ensure a tight seal and an electrical connection between the BPP and the gas diffusion unit. This was achieved using a system comprising disc springs, threaded rods and end plates, which was optimised through FEM simulations. Finally, a demonstrator stack with 15 cells was assembled and tested in-house, demonstrating a stack power of 25 kW, corresponding to 500 kW for 300 cells.



Dipl.-Ing. (FH) Frank Häußler
frank.haeussler@zsw-bw.de
+49 731 9530-791

MODELLIERUNG VON GDL-ECHTSTRUKTUREN

Um die Funktionsweise von Gasdiffusionslagen (GDL) – insbesondere unter dem Einfluss von Flüssigwasser – besser zu verstehen, sind detaillierte Simulationen an sogenannten Echtstrukturen erforderlich. Dazu werden reale Materialien mittels bildgebender Verfahren analysiert und anschließend als »digitaler Zwilling« rekonstruiert. An diesem Modell lassen sich zahlreiche Materialparameter simulieren, darunter Diffusion, Permeabilität, Deformation durch Verpressung in der Bipolarplatte (BPP), das Wasserhaushaltsverhalten sowie die Tortuosität der Porenstrukturen.

Für die Simulationen wird die Software GeoDict verwendet. Da der gesamte Charakterisierungsprozess in Python automatisiert ist, lassen sich effizient zahlreiche Varianten berechnen. Dies ermöglicht die Durchführung umfassender Materialverbesserungsstudien.

Die Abbildung zeigt das Ergebnis einer vollständigen Simulation, bei der der Einfluss von Wasser in der GDL auf die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle untersucht wurde. Der Fokus liegt dabei auf dem Transport und der Diffusion von Sauerstoffatomen durch die Realstruktur zur Reaktionsschicht. Die untere Abbildung stellt eine qualitative Auswertung der Partikeldichte dar. Sie visualisiert, wie viele Sauerstoffmoleküle in Abhängigkeit von verschiedenen Wassersättigungsgraden (Sat) entlang der Kanalrichtung (Z-Achse) die Reaktionsschicht erreichen (dargestellt als grüne Sprenkel auf der MPL, siehe obere Abbildung).

MODELLING OF REAL GDL STRUCTURES

In order to improve our understanding of gas diffusion layers (GDLs) – in particular under the influence of liquid water – detailed simulations on »real structures« are essential. This involves using imaging techniques to analyse real materials with and then reconstructing them as a digital twin. This model makes it possible to simulate numerous material parameters, including diffusion, permeability, deformation due to compression in the bipolar plate (BPP), water level and the tortuosity of pore structures. Simulations are conducted using software called GeoDict.

The entire characterisation process is automated in Python, which enables efficient calculation of numerous variants and allows researchers to conduct comprehensive material optimisation studies.

The figure shows the result of a completed simulation that examined how the presence of water in the GDL influenced the fuel cell's conductivity. It focused on the transport and diffusion of oxygen atoms through the real structure to the reaction layer. The lower figure depicts a qualitative analysis of particle density. It visualises the number of oxygen molecules that reach the reaction layer (shown as green dots on the microporous layer in the upper figure) at different water saturation levels (Sat) along the channel direction (Z-axis).

BRENNSTOFFZELLENSYSTEME FÜR DEN SCHWERLASTVERKEHR

Das europäische Gemeinschaftsprojekt RealHyFC (REliable durAbLe high-power HYdrogen fuelled PEM Fuel Cell stacks) bringt wichtige Akteure der gesamten Brennstoffzellen-Wertschöpfungskette zusammen, um noch verbleibende technologische Hürden für die industrielle Nutzung von wasserstoffbetriebenen PEM-Brennstoffzellen in Schwerlastanwendungen zu überwinden.

Im Projekt werden Stackdesigns mit Kohlenstoff-Komposit- und Metall-Bipolarplatten systematisch hinsichtlich Effizienz und Lebensdauer verglichen. Das ZSW brachte dazu den generischen HyFaB-Brennstoffzellenstack als Referenz für metallische Bipolarplatten ein und untersucht, wie unterschiedlich stark einzelne Zellbereiche im Betrieb belastet werden. Besonders die lokal variierenden Bedingungen über die Aktivfläche und die daraus resultierende Degradation werden detailliert analysiert. Mittels fortschrittlicher Analysetechniken, z. B. lokal aufgelöster Stromdichteverteilungen und Impedanzspektren (siehe Abbildung), lassen sich tiefgehende Rückschlüsse auf effizienzlimitierende und degradationsfördernde Mechanismen ziehen.

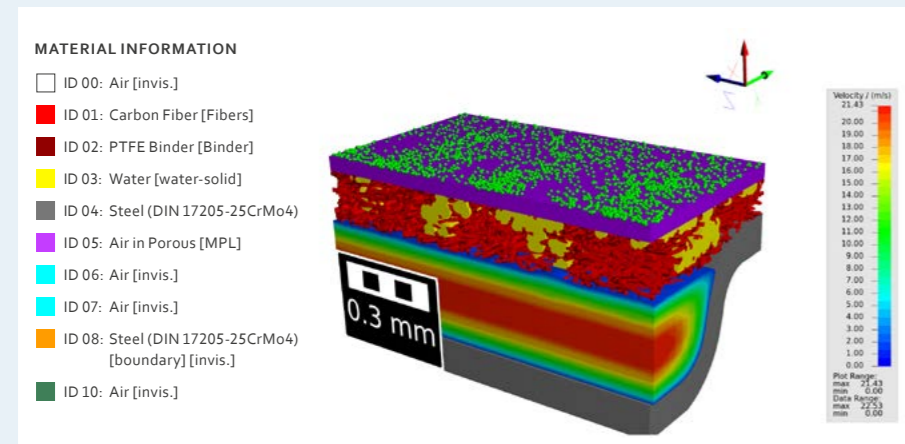
Als finales Projektresultat wird RealHyFC eine optimierte Open-Design-Stackplattform mit nachgewiesener hoher Effizienz und Langlebigkeit unter Schwerlast-Anwendungsbedingungen öffentlich bereitstellen. Das Projekt wird von der Clean Hydrogen Partnership und ihren Mitgliedern Hydrogen Europe und Hydrogen Europe Research unterstützt.

FUEL CELL SYSTEMS FOR HEAVY-DUTY VEHICLES

The collaborative European project »RealHyFC« (REliable durAbLe high-power HYdrogen fuelled PEM Fuel Cell stacks) brings together key stakeholders from the entire fuel cell value chain in order to overcome outstanding technological challenges to the industrial use of hydrogen-powered PEM fuel cells in heavy duty applications.

It includes systematically comparing stack designs featuring carbon composite and metal bipolar plates with regard to their efficiency and service life. The ZSW supplied the generic HyFaB generic fuel cell stack as the reference for metallic bipolar plates and examined the variation in stresses experienced by individual cell areas during operation. Detailed analysis focuses in particular on locally varying conditions across the active area and the resulting degradation. Advanced analytical techniques – such as locally resolved current density distribution and impedance spectra (see figure) – permit far-reaching conclusions regarding efficiency-limiting and degradation-inducing mechanisms.

As its final output, the RealHyFC project will publicly share an open design stack platform with demonstrably high efficiency and durability, even under the prevailing conditions in heavy goods applications. The project is supported by the Clean Hydrogen Partnership and its members Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.



Ergebnis der GDL-Simulation in der BZ-Umgebung (Spektralfarben = Luft-Geschwindigkeitsverteilung im Verteilerfeldkanal). Grüne Sprenkel oben: Sauerstoffmoleküldichte (Kugeldichte, symbolisch).

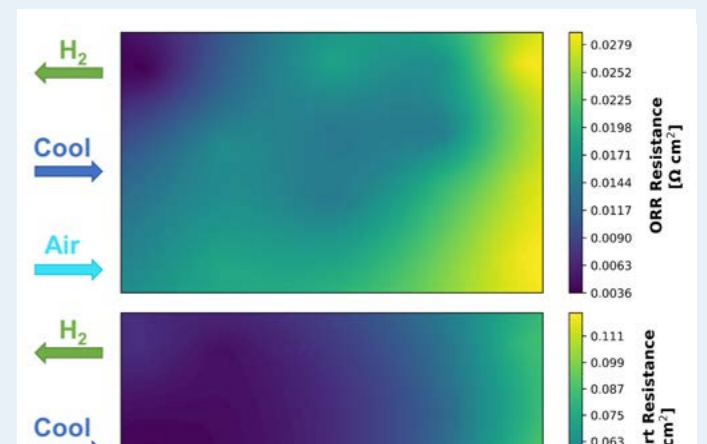
Result of the GDL simulation in the FC environment (spectral colours = air speed distribution in the flow field channel). Green speckles on top: Oxygen molecule density (sphere density, symbolic).

Lokal aufgelöste Polarisationskurven, aufgenommen mit einer Stromdichtemessplatte innerhalb des RealHyFC-Referenzstacks. Die verschiedenen Bereiche weisen deutlich unterschiedliche Leistungsniveaus auf.

Locally resolved polarisation curves recorded employing a current density measurement board inside the RealHyFC reference stack. The different regions feature notably different performance.

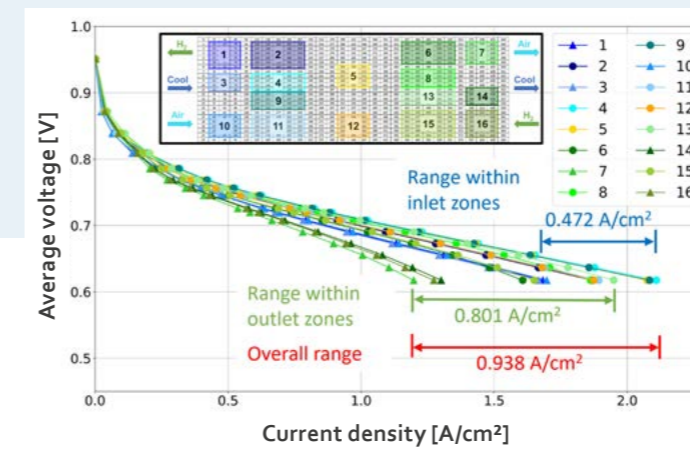
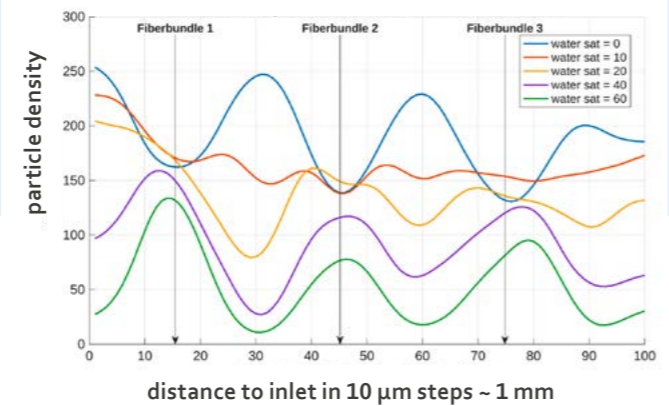
Mittels ortsaufgelöster Impedanzmessungen bestimmter lokaler Widerstand aus Sauerstoff-Reduktionsreaktion (oben) und Massentransporteffekten (unten).

Locally resolved resistance due to the oxygen reduction reaction (top) and mass transport (bottom) obtained from a spatially resolved impedance measurement employing equivalent circuit analysis.



Qualitative Auswertung der Partikeldichte in Flussrichtung bei verschiedenen Sättigungsgraden.

Qualitative analysis of particular density in the flow direction at different saturation levels.



Dr. Florian Wilhelm
florian.wilhelm@zsw-bw.de
+49 731 9530-203

Dr. Florian Wilhelm
florian.wilhelm@zsw-bw.de
+49 731 9530-203

Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)

UNSERE KERNKOMPETENZEN

Das ZSW betreibt seit 2001 am Standort Ulm ein Brennstoffzellentestzentrum mit heute mehr als 50 Testständen mit einer Leistung bis 250 kW. Der Fokus liegt auf der professionellen Dauererprobung von Brennstoffzellenstapeln, -systemen und -systemkomponenten. Die Tests liefern belastbare Daten zur Bewertung von Alterung, Lebensdauer und Robustheit. Die Auswertung erfolgt mittels umfangreicher Analytik und komplexer Methoden zur Fehleranalyse – auch KI-basiert. Das Testdatenarchiv umfasst mittlerweile über eine Million Betriebsstunden.

In die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen und -systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen sowie für Fahrzeuge fließen jahrzehntelange Forschungsarbeiten und Industrieerfahrung ein. Das Leistungsspektrum umfasst die Erprobung und Optimierung von Design- und Betriebsstrategien hybrider Systeme bis hin zur Marktreife. Daneben werden Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien und Produktzertifizierungen durchgeführt. Diese erfolgen meist im Auftrag der Industrie oder über öffentlich geförderte Projekte, deren Ergebnisse der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

Ein dritter Schwerpunkt ist die ganzheitliche Betrachtung von Wasserstoff als Kraftstoff. Das Team ist mit seiner Erfahrung in der Brennstoffzellentechnik und der Nutzung von Wasserstoff durch mehrere Projekte in den Aufbau der europäischen Wasserstoffinfrastruktur eingebunden. Hierbei geht es um den Nachweis der Einhaltung internationaler Betankungsprotokolle für Wasserstofftankstellen bezüglich der Abnahme nach DIN ISO 19880 sowie um die Einhaltung der für den Brennstoffzellenbetrieb notwendigen Wasserstoffqualität gemäß ISO 14687-2.



Dr. Alexander Kabza
Head of Department
alexander.kabza@zsw-bw.de
+49 731 9530-832



»Langfristig sind die weltweiten Klimaziele ohne Wasserstofftechnologien nicht zu erreichen. Jetzt ist es entscheidend, Wasserstoff in unseren Alltag zu integrieren.«

»In the long term, global climate goals cannot be achieved without hydrogen technologies. What we need to do now is integrate hydrogen into our everyday lives.«

OUR CORE AREAS OF EXPERTISE

The ZSW has operated a fuel cell test centre at its Ulm site since 2001, which now features over 50 test benches with a capacity of up to 250 kW. The focus is on professional endurance tests on fuel cell stacks, fuel cell systems and fuel cell system components. The tests provide data for the evaluation of ageing, service life and robustness. The test evaluation is carried out using a wide range of analytical tools and complex methods for fault analysis – including AI-based tools and methods. The test data archive now stands at more than one million operating hours.

Decades of research and industry experience have gone into developing fuel cell systems and fuel cell system components for stationary systems, on-board power supply and emergency power supply systems and applications in vehicles. The ECS department's services include testing and optimisation of design and operating strategies for hybrid systems, all the way to market readiness. It also conducts safety assessments, packaging feasibility studies and product certification processes. These are usually performed as a service for industrial customers or through publicly funded projects, the results of which are available to the general public.

The department's third focus is assessing all aspects of hydrogen as a fuel. Given its experience in fuel cell technology and in the use of hydrogen, the ECS team is involved in several projects targeting the development of the European hydrogen infrastructure. These projects concern proof of compliance with international fuelling standards for hydrogen filling stations, with regard to acceptance in accordance with DIN ISO 19880 as well as conformity with the hydrogen quality levels required for fuel cell operation pursuant to ISO 14687-2.



Analytik für ins Wasser eingebrachte Abbauprodukte von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren (HyLaB).

Analytics on by-products emitted into water due to degradation in fuel cells and electrolysers (HyLaB).

ANALYTIK ZUR UNTERSUCHUNG VON BRENNSTOFFZELLEN- UND ELEKTROLYSEWASSER

Das Wasserstoffqualitätslabor HyLaB ist Teil des holistischen Ansatzes im Brennstoffzellentestzentrum und wurde um den Bereich Analytik erweitert, um zu untersuchen, welche Stoffe von der Brennstoffzelle oder dem Elektrolyseur über das Produktwasser abgegeben werden und wie diese mit der Alterung zusammenhängen.

Bereits ab der Erstkonditionierung unterliegt eine Brennstoffzelle einem kontinuierlichen Alterungsprozess, sichtbar als Performanceverlust und durch Änderungen elektrischer Kenngrößen. Häufige Ursachen sind der Abbau wesentlicher Funktionen, etwa Membranersetzung oder Korrosion der Bipolarplatten. Die entstehenden Abbauprodukte werden mit dem Produktwasser ausgetragen und geben Aufschluss über die zugrunde liegenden Alterungsmechanismen.

Abbauprodukte von Bipolarplatten und Dichtungen werden im Spurenbereich bis zu ng/l oder ppt (parts per trillion) mittels ICP-MS (Inductively Coupled Plasma in Verbindung mit einem Massenspektrometer) nachgewiesen. Die Degradation der Membran zeigt sich durch den Abbau des in der Regel perfluorierten Polymers. Die mit dem Produktwasser ausgespülten Fragmente werden mittels LC-MS-MS (Liquid Chromatography gekoppelt mit Tandem-MS) nachgewiesen. Perfluorierte Polymere lassen sich bis in den einstelligen ppb-Bereich (µg/L) und durch optionale Anreicherung bis zu ng/L (ppt) quantifizieren. Vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen zum möglichen Verbot von PFAS durch die EU-Chemikalienverordnung REACH kann das Labor datenbasiert wichtige Aussagen zur Freisetzung dieser kritischen Stoffgruppe treffen.

ANALYTICS TO EXAMINE FUEL CELL AND ELECTROLYSIS OUTLET WATER

The hydrogen quality laboratory HyLaB is part of the holistic approach pursued at the fuel cell test centre. It has been supplemented with analytic technologies to examine the substances that fuel cells and electrolysers emit in their outlet water and how these emissions depend on the system's age. From initial conditioning onwards, a fuel cell is subject to a continuous ageing processes, which takes visual form in performance losses and changes in electrical parameters. Common causes include the deterioration of vital functions, such as membrane degradation and corrosion of the bipolar plates. The resulting by-products are carried out in the outlet water and offer clues as to the underlying ageing mechanisms.

The by-products released by bipolar plates and membranes can be detected in trace levels down to ng/l or ppt (parts per trillion) using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Membrane degradation manifests in disintegration of what is usually a perfluorinated polymer. The fragments washed out in the outlet water can be identified using liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry (LC-MS-MS). Perfluorinated polymers can be quantified in the single-figure ppb range (µg/L) and through optional enrichment to ng/L range (ppt). Against the backdrop of continuing debate around a potential ban on PFAS in the EU REACH Regulation, the laboratory is in a position to issue important, data-based statements on the research of these critical substances.



Dr. Vladimir Valter
vladimir.valter@zsw-bw.de
+49 731 9530-366

ÖFFENTLICHKEITS- ARBEIT

PUBLIC RELATIONS



IMPRES SIONS

20 25

> Eine Landtagsfraktion, ein Side Event und jede Menge Besucher auf dem Gemeinschaftsstand THE LÄND. Die diesjährige Intersolar Europe in München war ein voller Erfolg.

> A parliamentary group visit, a side event, and plenty of visitors at the THE LÄND joint stand – this year's Intersolar Europe in Munich was a great success.

v ZSW-Stand auf der Abschlussveranstaltung der Lindauer Nobelpreisträgertagung.

v The ZSW stand at the closing event of the Lindau Nobel Laureate Meeting.



> ZSW-Stand auf der Hydrogen Expo Hamburg.

> The ZSW stand at Hydrogen Expo Hamburg.



^ ZSW-Stand auf der Hannover Messe. Links: Baden-württembergische Forschungsministerin Petra Olschowski mit Frank Häußler (ZSW).

^ The ZSW stand at Hannover Messe. Left: Minister for Science, Research and the Arts of Baden-Württemberg Petra Olschowski with Frank Häußler (ZSW).

< Besuch einer Delegation aus der niederländischen Provinz Noord-Brabant zur Kooperation mit Baden-Württemberg im Bereich der Elektrolyse.

< Visit of a delegation from the Dutch province of Noord-Brabant to discuss cooperation with Baden-Württemberg in the field of electrolysis.

> ZSW im Fokus der Sommertour für Entscheidungsträger aus dem Landtag und den Ministerien zu Batterietechnologie in Baden-Württemberg.



> The ZSW hosts a summer tour for decision-makers from the state parliament and ministries on battery cell tech in Baden-Württemberg.

> Die 19. Ulmer elektrochemischen Tage (UECT): lebendige Atmosphäre, Inspiration, Austausch und Awards.

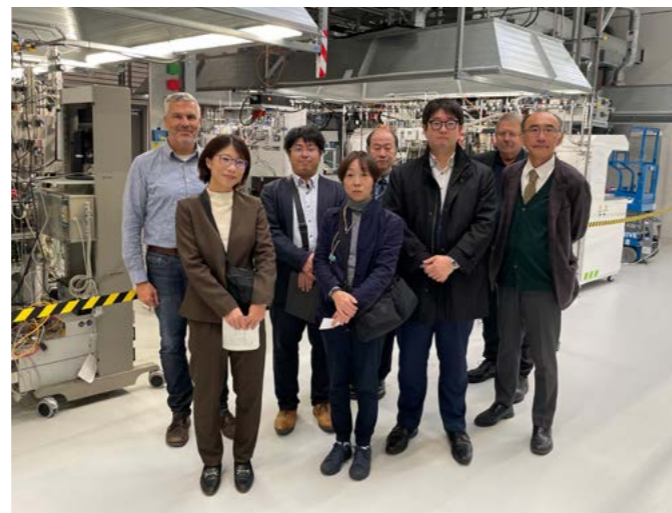


> The 19th Ulm Electrochemical Days (UECT): a lively atmosphere, inspiration, engagement and awards.



> Science Talk mit der »Climate Change and Energy Research Division« des Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection in HyFaB.

> Science talk with the »Climate Change and Energy Research Division« of the Tokyo Metropolitan Research Institute for Environmental Protection at HyFaB.



^ Das ZSW richtete den 4. Perovskit-Workshop Baden-Württemberg aus, bei dem über 80 Teilnehmende vom Austausch zwischen Industrie und Wissenschaft profitierten.

^ ZSW hosted the 4th Perovskite Workshop Baden-Württemberg, where more than 80 participants benefited from the exchange between industry and science.



< 10-jähriges Jubiläum des »Leitsterns Energieeffizienz« im Haus der Architekten in Stuttgart.

< 10th anniversary of the »Leitstern Energieeffizienz« award at the House of Architects in Stuttgart.

> Die Höhenrettungsgruppe der Stuttgarter Feuerwehr und die Polizeihubschrauberstaffel trainierten erstmals in Baden-Württemberg Anflug und Rettung von den Maschinenhausdächern der WINSENT-Forschungswindanlagen.

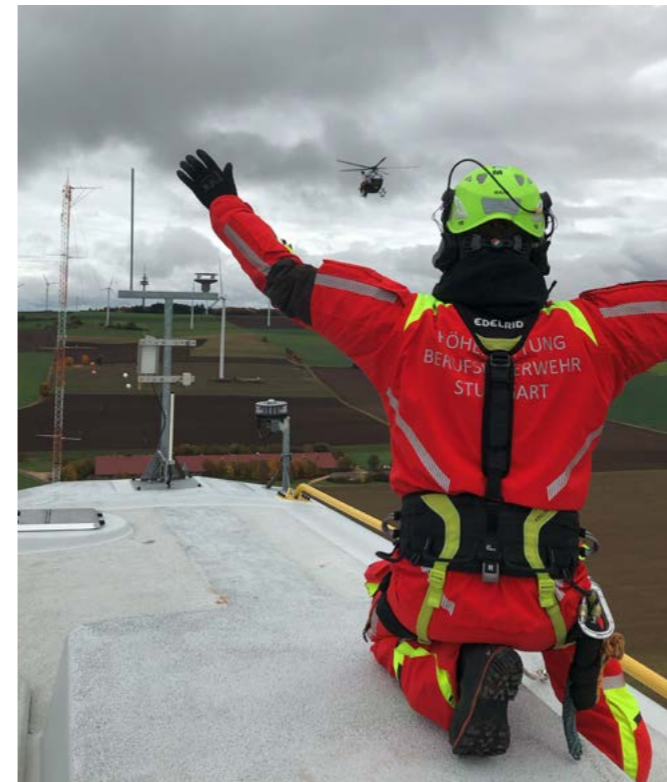
> The Stuttgart Fire Department's high-angle rescue team and the police helicopter unit conducted their first joint training in Baden-Württemberg, practicing approach and rescue operations from the nacelle rooftops of the WINSENT research wind turbines.

> Rechts unten: Das 40. Jubiläum des PV-Symposiums auf Kloster Banz in Bad Staffelstein: Vorstand Prof. Dr. Michael Powalla eröffnete das Symposium als fachlicher Leiter.

> Bottom right: The 40th anniversary of the PV Symposium at Kloster Banz in Bad Staffelstein, where Executive Board Member Prof. Dr. Michael Powalla opened the event as the scientific director.

> Zum vierten Mal richtete das ZSW das SustAInable-Event aus, das sich Künstlicher Intelligenz und nachhaltigen Technologien widmet.

> For the fourth time, the ZSW hosted the SustAInable event dedicated to artificial intelligence and sustainable technologies.





< Strategietreffen der H2-Transformationsstrategie Heilbronn-Franken in HyFaB.

< Strategy Meeting of the H2 Transformation Strategy Heilbronn-Franken at HyFaB.



> Energiepolitisches Forum von ZSW und KEA-BW: Das Thema des diesjährigen Forums war »Erfolgreicher Klimaschutz in Zeiten knapper Kassen«.

> Energy Policy Forum by ZSW and KEA-BW: This year's forum focused on »Successful climate protection in times of tight budgets«.

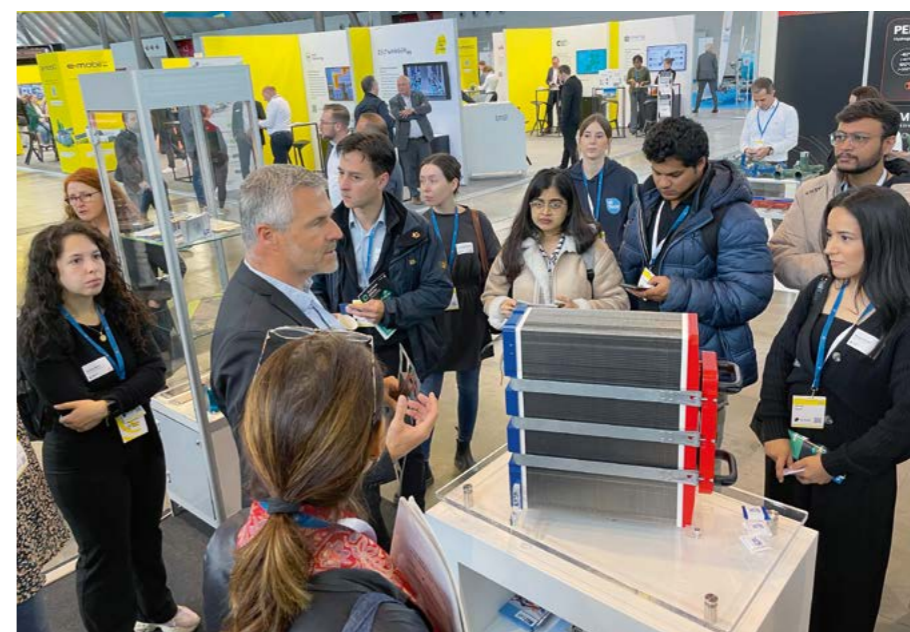


^ Die Fachgebiete MSA und ECA auf der Volta-X Energy Systems Expo in Stuttgart.

^ The MSA and ECA departments at the Volta-X Energy Systems Expo in Stuttgart 2025.

v Das Team belegte 2025 mit dem ZSW-Boot den 2. Platz beim überregional beliebten Ulmer Festzug Nabada auf der Donau.

v The team took 2nd place in 2025 with the ZSW boat at Ulm's popular Nabada festival on the Danube.



^ H2-Wandel-Netzwerktreffen am ZSW in Ulm mit Ludwig Jörissen (ECG).

^ H2 Transition network meeting at the ZSW in Ulm with Ludwig Jörissen (ECG).

< ZSW-Stand auf der Hy-Fcell in Stuttgart.

< The ZSW stand at Hy-FCell in Stuttgart.

> Jugendliche der Science Academy Baden-Württemberg beschäftigten sich zwei Wochen lang mit Nachführsystemen für PV-Anlagen und konnten zum Abschluss Einblicke in die Forschungsarbeit am ZSW gewinnen.

> Students from the Science Academy Baden-Württemberg spent two weeks working on tracking systems for PV installations and concluded the program with insights into the research conducted at the ZSW.



v 2025 fand die EU PVSEC in Bilbao statt, bei der der Geschäftsbereich Photovoltaik mit einer Reihe an Postern, Vorträgen und einem Stand vertreten war.

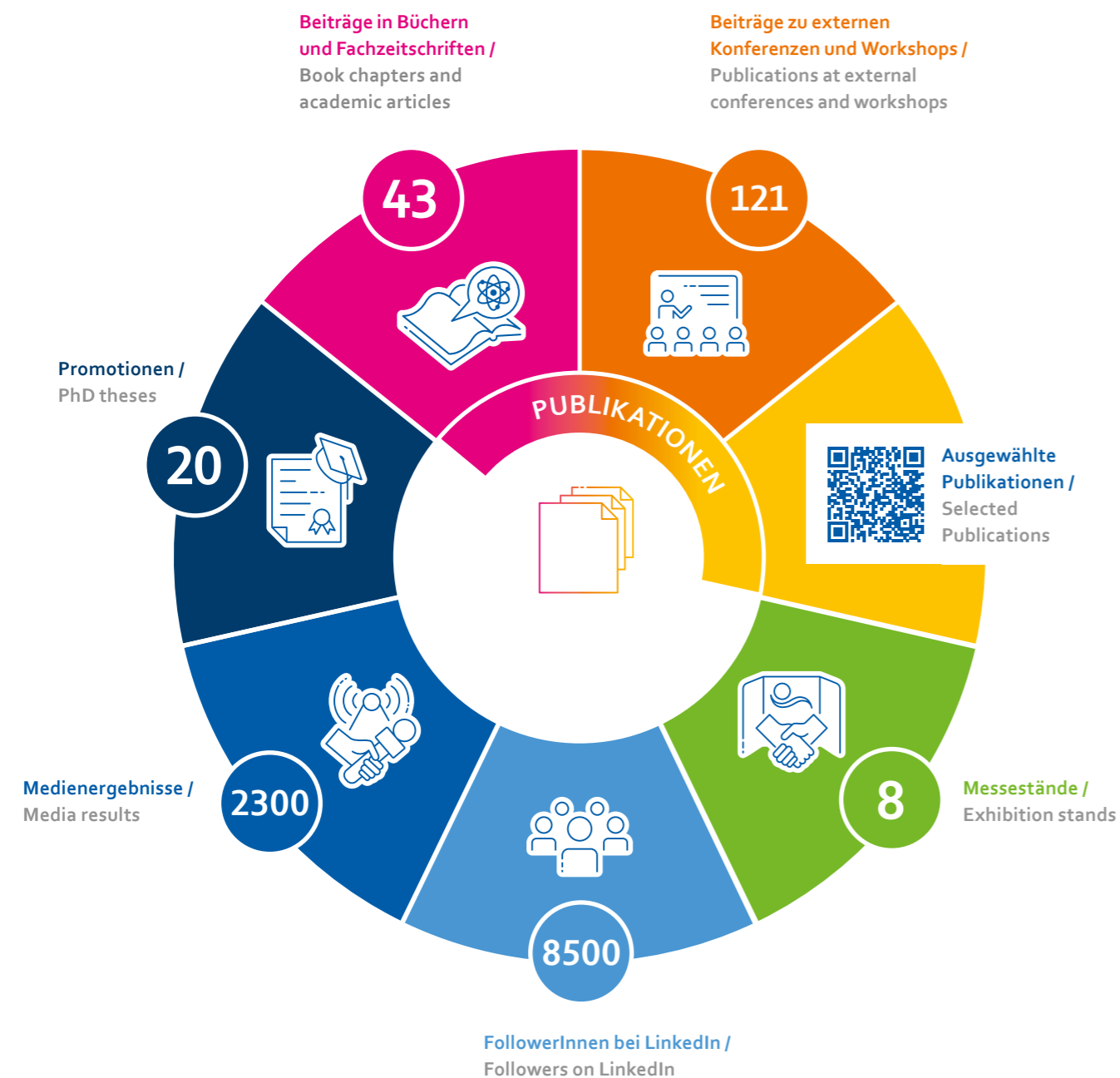
v In 2025, the EU PVSEC took place in Bilbao, where the Photovoltaics Division was represented with a series of posters, presentations and an exhibition booth.



^ ZSW-Batterieforscher erhält WITec Paper Award Silber 2025: Dr. Umair Nisar (links) sowie Peter Axmann, Stefan Gomes da Costa (Oxford Instruments) und Markus Hölzle.

^ ZSW battery researcher receives the 2025 WITec Paper Award (Silver): Dr. Umair Nisar (left), along with Peter Axmann, Stefan Gomes da Costa (Oxford Instruments), and Markus Hölzle.

Sichtbarkeit Visibility



Mitgliedschaften Memberships

- AGEB Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
- Allianz BIPV Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V.
- BVES Bundesverband Energiespeicher Systeme e. V.
- Cluster H2BW Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg
- Cluster Elektro Cluster Elektromobilität Süd-West
- CPN Clean Power Net
- DFBEW / OFATE Deutsch-französisches Büro für die Energiewende / Office franco-allemand pour la transition énergétique
- DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e. V.
- DPP Deutsche Phosphor-Plattform e. V.
- DWV Deutscher Wasserstoff-Verband e. V.
- ECS Electrochemical Society
- EERA European Energy Research Alliance
- ESPP European Sustainable Phosphorus Platform
- EUREC The Association of European Renewable Energy Research Centers
- FVEE Forschungsverbund Erneuerbare Energien
- GDCh Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
- H2-Wandel e. V. Modellregion Grüner Wasserstoff Baden-Württemberg e. V.
- HER Hydrogen Europe Research
- HZwo e. V. Innovationscluster Wasserstoff Chemnitz
- innBW Innovationsallianz Baden-Württemberg e. V.
- InnoRegio Ulm Verein zur Förderung der Innovationsregion Ulm - Spitze im Süden e. V.
- KLiB Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.
- LiPLANET e. V. Network of Li Battery Pilot Lines
- OpenEMS OpenEMS Association e. V.
- PEE BW Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e. V.
- Plattform P-Rück Plattform zur Klärschlamm Entsorgungssicherheit und Phosphorrückgewinnung (DWA-Landesverband Baden-Württemberg)
- SmartGridsBW SmartGrids-Plattform Baden-Württemberg e. V.
- Solar Cluster BW Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
- SolarPower SolarPower Europe
- STRise Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy
- unw Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e. V.
- VDMA Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum, Arbeitsgemeinschaft Windindustrie
- WindForS Forschungscluster »WindForS – Windenergieforschung Süd«

DOKUMENTATION

DOCUMENTATION



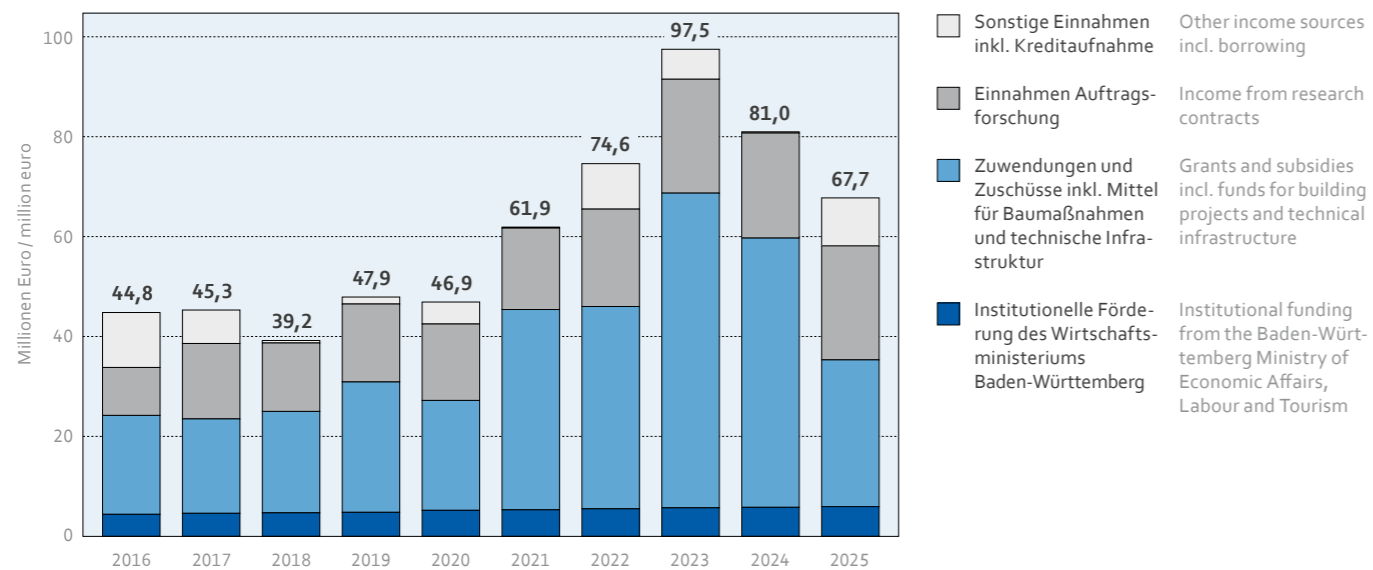
Finanzbericht

Financial Report

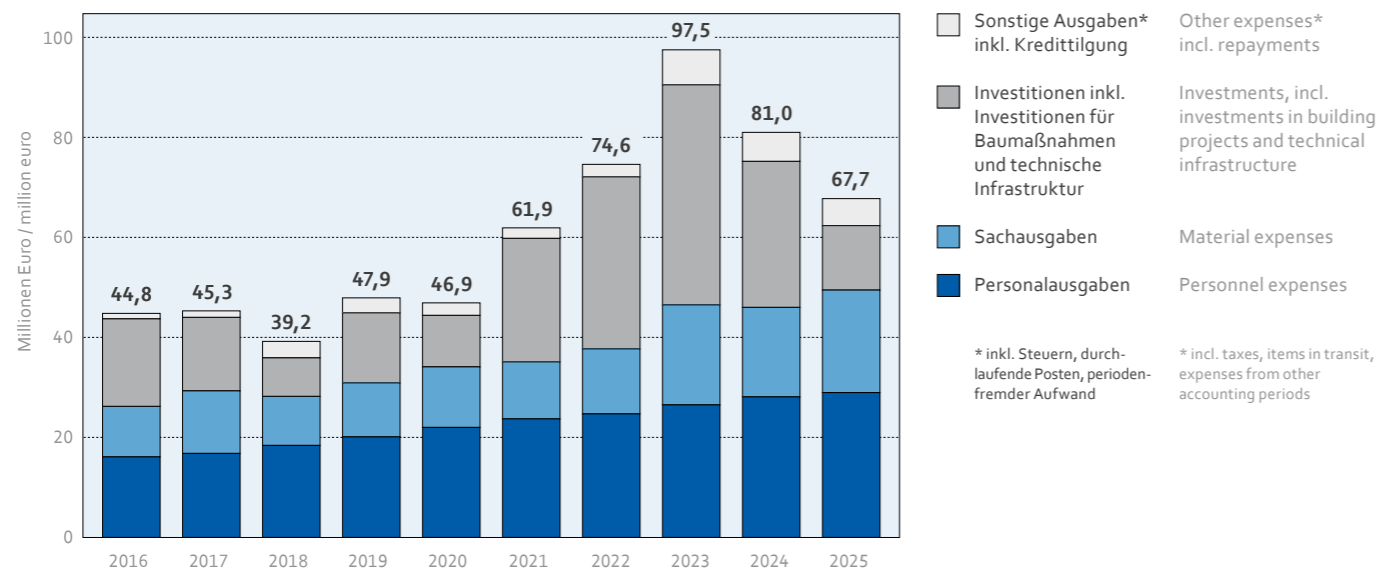
Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 67,7 Mio. Euro und damit unter dem Niveau von 2024, weil in den Vorjahren höhere Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen in den Themenfeldern Brennstoffzellen und Batterien zugegangen sind. Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2025 um 0,1 Mio. auf 5,9 Mio. Euro.

The revenue from ordinary business activities in the past year amounted to 67.7 million euro. This fell short of the 2024 level because the ZSW received higher grant funding in previous years to finance investments in fuel cell and battery research. The proportion of institutional funding provided by the state of Baden-Württemberg increased by 0.1 million euro to 5.9 million euro in 2025.

Finanzierungsstruktur des ZSW / Financial structure of the ZSW



Ausgabenentwicklung des ZSW / Development of expenditures at ZSW



Personalentwicklung

Staff Development



Das ZSW ist mit seinen Zukunftsthemen und Arbeitsbedingungen, dem kollegialen Betriebsklima sowie den vielfältigen Entwicklungsperspektiven für seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ein attraktiver Arbeitgeber.

Die Mitarbeiterkapazität hat sich im Jahr 2025 gegenüber dem Vorjahr von 322 Vollzeitstellen auf 307 verringert. Das entspricht einer Beschäftigtenzahl von 335. Mit einem Anteil von 84 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität liegt die Produktivität auf einem stabil hohen Niveau. Das ZSW ist auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland attraktiv. So haben gut 12 % aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft. Die Kolleginnen und Kollegen kommen aus 24 verschiedenen Ländern.

Der Frauenanteil erhöht sich 2025 auf 25 %. Das ZSW strebt an, diesen für technisch orientierte Forschungsinstitute typischen Anteil zu erhöhen, indem es möglichst flexibel ausgestaltete Arbeitszeitmodelle anbietet, die die Vereinbarkeit von Beruf und Familie erleichtern.

Einen hohen Stellenwert nehmen die Vernetzung des ZSW mit Hochschulen, die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten ein. Daher waren 2025 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 100 Studierende sowie Praktikantinnen und Praktikanten am ZSW tätig. Im Berichtsjahr fertigten 20 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertation an.

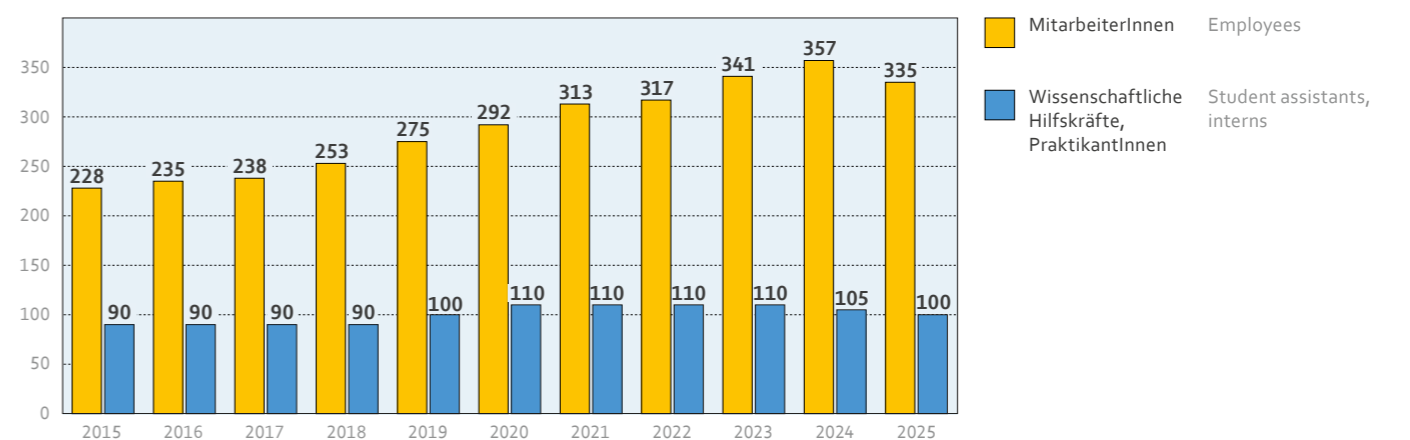
By examining future-focused topics and offering its employees excellent working conditions, a welcoming working climate and wide-ranging professional development opportunities, the ZSW is an attractive employer.

In terms of staffing, the full-time equivalent fell to 307 in 2025 from 322 in the previous year. The total number of staff employed is 335. With research and scientific staff accounting for 84% of the total workforce, productivity remains steady and at a high level. The ZSW also attracts academics from abroad. Roughly 12% of all staff have foreign citizenship, with 24 different nationalities represented in the workforce.

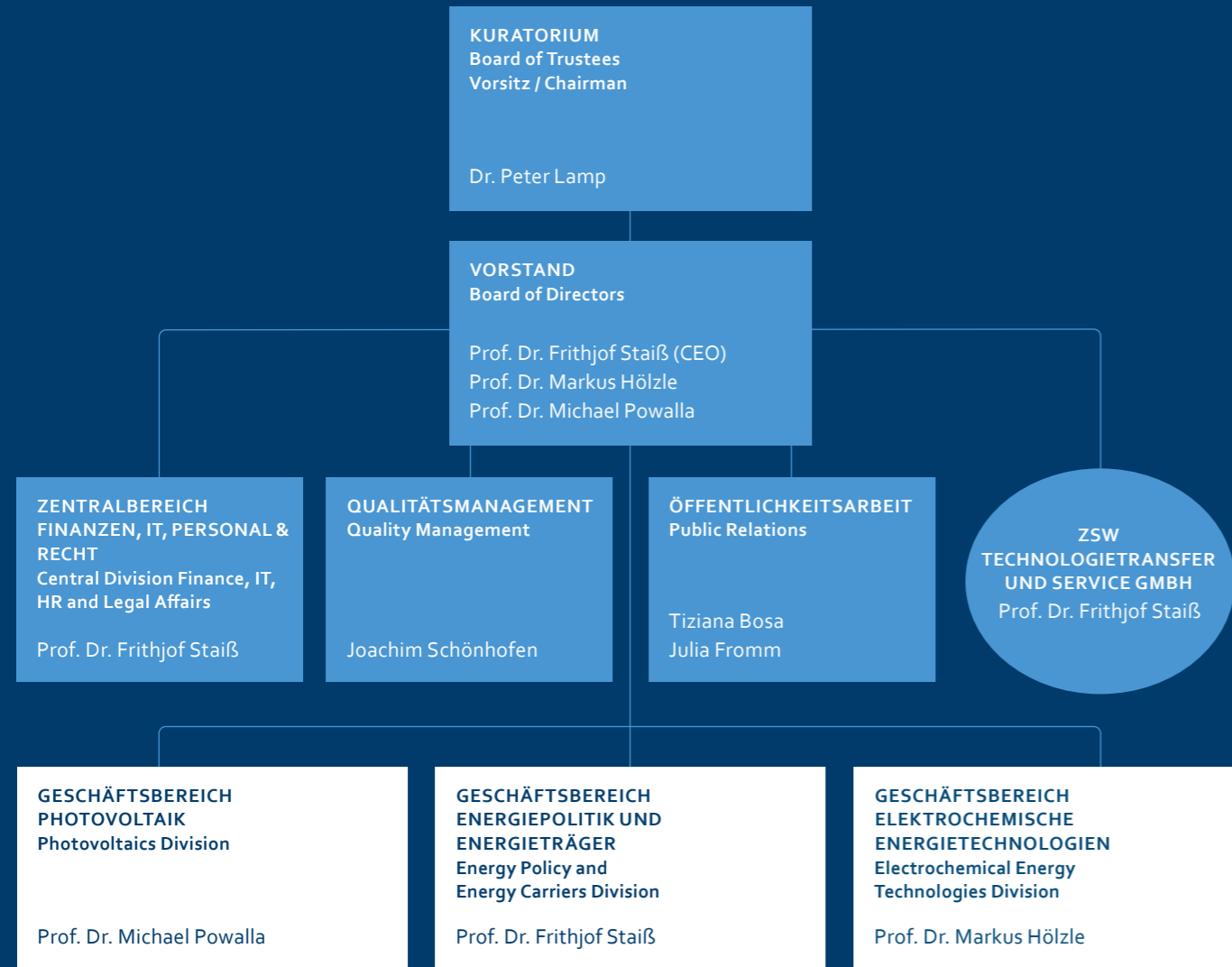
In 2025, the proportion of women rose to 25%. The ZSW is keen to increase this figure – which is typical for research institutes with a focus on technical subjects – by offering working time models that are as flexible as possible and make it easier to combine career and family.

Networking with universities, assisting with academic training in the form of lectures, seminars and internships, and supervising research papers and dissertations are high priorities for the ZSW. In this context, there were 100 students and interns working at the ZSW in 2025 in addition to the staff employed under the salary scheme for state employees (Tarifvertrag der Länder – TV-L). In the reporting year, 20 doctoral candidates completed their dissertations at the ZSW.

Anzahl der Beschäftigten zum 31.12. / Number of employees as of 31/12



Organisationsstruktur Organisational Structure



Standorte Locations



- ZSW STUTTGART**
Meitnerstraße 1, 70563 Stuttgart
- WINDTESTFELD**
- SOLARTESTFELD**
- ZSW ULM**
- WINSENT WIND TEST SITE**
Gemarkung Stötten /
73312 Geislingen an der Steige
- WIDDERSTALL SOLAR TEST SITE**
Widderstall 14, 89188 Merklingen
- ZSW ULM**
Helmholtzstraße 8, 89081 Ulm
Lise-Meitner-Straße 24, 89081 Ulm

Weitere Organigramme auf unserer Website:
You can find further organisation charts on our website:

KONTAKT / CONTACT STUTTGART

Julia Fromm
+49 711 7870-278
julia.fromm@zsw-bw.de

KONTAKT / CONTACT ULM

Tiziana Bosa
+49 731 9530-601
tiziana.bosa@zsw-bw.de

Bildnachweis

Image credits

UMSCHLAG AUSSEN:
Alexander Fischer

UMSCHLAG INNEN:
Elvira Eberhardt

David Arzt: Seiten 6-7, 22 (oben), 40
Martin Duckek: Seiten 5, 10-11, 15 (oben), 24, 25 (oben rechts), 26 (oben), 27, 31 (oben links), 73
Elvira Eberhardt: Seiten 12, 26 (unten), 34, 69 (rechts), 90-91
e-mobil BW/KDBUSCH.COM: Seite 78 (oben)
Alexander Fischer: Seiten 4, 8-9, 20-21, 22 (oben rechts), 32 (oben, Mitte), 84-85
H2 Wandel/Karin Emler: 81 (oben rechts)
Matthias Merz: Seite 79 (unten rechts)
Patrick Zanker Fotografie: Seite 48
SRF AMICA, MPA/Universität Stuttgart: Seiten 32-33 (unten)
Mit KI ergänzt: Seite 23
Fotos ohne Angabe: ZSW

Impressum

Imprint

HERAUSGEBER / PUBLISHER
Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung
Baden-Württemberg (ZSW)
Meitnerstraße 1, 70563 Stuttgart
Tel: +49 711 7870-0
Email: info@zsw-bw.de

REDAKTION / EDITORIAL TEAM
Julia Fromm
(verantwortlich / Chief Editor)
Tiziana Bosa
Patricia Harprecht

**ÜBERSETZUNGEN & LEKTORAT /
TRANSLATION & COPYEDITING**
Baker & Company
Bergsonstraße 65
81245 München

LAYOUT & SATZ / LAYOUT & SETTING
Koivunen Kommunikationsdesign
Breitscheidstraße 87
70176 Stuttgart



Kontakt / Contact



INFO@ZSW-BW.DE
WWW.ZSW-BW.DE

ZSW Stuttgart

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
+49 711 7870-0

ZSW Ulm

Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
+49 731 9530-500

Helmholtzstraße 8

89081 Ulm
+49 731 9530-0

Solartestfeld Widderstall / Widderstall solar test site

Widderstall 14
89188 Merklingen
+49 711 7870-0

Windtestfeld WINSENT/ WINSENT wind test site

Gemarkung Stötten /
73312 Geislingen an der Steige
+49 711 7870-0



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2015