

ZSW 2024

Jahresbericht
Annual Report



INHALT

CONTENTS

4	Vorwort / Foreword
5	Stiftung / Foundation
6	Leitbild / Our Mission
10	Erfolge 2024 / Success Stories 2024
16	Schwerpunktbericht / Focus Report Die HyFaB Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen am ZSW / The HyFaB research factory for hydrogen and fuel cells at the ZSW
38	Fachgebiete & Forschungsprojekte / Departments & Research Projects
40	Systemanalyse / Systems Analysis
44	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
48	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
52	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
56	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
60	Produktionsforschung / Production Research
64	Akkumulatoren / Accumulators
66	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
70	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
74	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
76	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
78	Impressionen 2024 / Impressions 2024
82	Sichtbarkeit / Visibility
83	Mitgliedschaften / Memberships
84	Dokumentation / Documentation
86	Finanzbericht / Financial Information
87	Personalentwicklung / Staff Development
88	Organisationsstruktur / Organisational Structure
89	Standorte / Locations
90	Bildnachweis / Image Credits
90	Impressum / Imprint

Copyright

Das Urheberrecht steht dem Herausgeber zu. Veröffentlichungen und auszugsweise
Verwendung sind ohne ausdrückliche Genehmigung des Herausgebers nicht zuläs-
sig. 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.

VORWORT FOREWORD

Die Diskussion um den Bundeshaushalt 2025 und die vorläufige Haushaltsführung haben die gesamte Energieforschung vor erhebliche Herausforderungen gestellt. Andererseits hat sich das europäische Umfeld mit der Netto-Null-Industrie-Verordnung, die Investitionen in Produktionskapazitäten für Schlüsseltechnologien der Energietransformation fördern soll, positiv entwickelt. Das ZSW ist mit seinen Themen und seiner Industrienähe sehr gut aufgestellt, dies zu unterstützen.

Ein Beispiel hierfür ist die ZSW-Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen HyFaB, der sich unser diesjähriger Schwerpunktbericht widmet. HyFaB unterstützt die Entwicklung und Industrialisierung von Brennstoffzellenstacks und trägt zur Qualifizierung von Fachkräften bei. Weitere Highlights des vergangenen Jahres sind der erfolgreiche Technologietransfer für einen kommerziellen Elektrolyseur der Megawatt-Klasse sowie Systemanalysen zur Wasserstoffinfrastruktur, Erfolge im Bereich der Langzeitstabilisierung von Perowskit-Solarmodulen oder die Inbetriebnahme des Powder-Up!-Technikums, das Materialsynthesen für neuartige Batterien im industrienahen 100-kg-Maßstab ermöglicht.

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 den Vorsitzenden Professor Christian Mohrdieck und seinen Nachfolger 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!



Der Vorstand des ZSW
(v.l.n.r.):
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:



The discussion surrounding the German federal government budget for 2025 and the provisional management of budget funds have posed considerable challenges for energy research as a whole. Developments have been positive in the wider European context, on the other hand, where the Net-Zero Industry Act has been adopted with a view to promoting investment in production capacities for key technologies in the energy transformation. The ZSW is in an excellent position to support this move, given the focal points of its research and its close links with industry. One example of these credentials is the ZSW research factory for hydrogen and fuel cells, HyFaB, which is the centre of attention in this year's focus report. HyFaB underpins the development and commercialisation of fuel cell stacks and plays a part in providing training in relevant skills. Other highlights of the past year include the successful transfer of technology for a commercial megawatt-class electrolyser and system analyses relating to the hydrogen infrastructure, success stories in the long-term stabilisation of perovskite solar modules, and the start of operation at the Powder-Up! pilot plant, which will enable material syntheses for new types of batteries on the required industrial 100 kg scale.

There is considerable interest in our research. All the employees at the ZSW are most deserving of the credit for this success and the attention we receive, and we would like to express our sincere gratitude for their hard work and commitment. We would also like to thank the members of the Board of Trustees and its Chair, Professor Christian Mohrdieck, and his successor, Dr. Peter Lamp. Thanks are also due to the state of Baden-Württemberg for its financial support and excellent cooperation, and to our partners from enterprise, public research funding and science. We hope everyone will enjoy reading the ZSW Annual Report and find it most interesting!

STIFTUNG FOUNDATION



Das ZSW-Gebäude in Stuttgart.

The ZSW building in Stuttgart.

Das ZSW wurde 1988 als gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts gegründet.

Stiftungsauftrag:

»Die Stiftung verfolgt den Zweck, 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.«

The ZSW was established in 1988 as a non-profit foundation under the civil code.

The goal of the foundation 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.«

STIFTER DES ZSW / ZSW FOUNDERS

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

- > Land Baden-Württemberg / Federal State of Baden-Württemberg
- > Universität Stuttgart / University of Stuttgart
- > Universität Ulm / Ulm University
- > Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. / German Aerospace Center

Unternehmen / Commercial enterprises

- > Aare-Tessin AG für Elektrizität
- > Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Daimler AG
- > EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- > Fichtner GmbH & Co. KG
- > IN-TEC GmbH
- > Martin Fritz Marketing Kommunikation GmbH
- > Messer GmbH
- > Robert Bosch GmbH
- > Schlaich Bergermann und Partner
- > Telefunken Electronic GmbH
- > Verband für Energie- und Wasserwirtschaft Baden-Württemberg e. V. (ehemals /formerly: Verband der Elektrizitätswerke Baden-Württemberg e. V.)

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, der Steigerung der Energieeffizienz und dem Denken in Stoffkreisläufen 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 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 gemeinsam 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 und Partner hat oberste Priorität. Als unabhängiges Institut reagieren wir schnell und flexibel. Die Qualität unserer Leistungen, Budget- und Termintreue sowie Vertraulichkeit sind zentrale Werte unseres Engagements. 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 zentrale Elemente 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

SUCCESS STORIES 2024



Innovationen für eine klimaneutrale Energieversorgung sind das Metier des ZSW. Nicht immer ist der Weg zu neuen Erkenntnissen geradlinig, denn oft müssen bestehende Denkansätze geprüft, revidiert und durch neue ersetzt werden. Umso erfreulicher ist es, wenn das gelingt und Erfolge auch von unseren Partnern, der Politik und der Öffentlichkeit gewürdigt werden. Einige Beispiele aus den Forschungsfeldern des ZSW im Jahr 2024 stellen wir hier exemplarisch vor.

The ZSW develops innovations to bring about a climate-neutral energy supply. The path to new insights is not always straight: it often means questioning, revising and replacing existing ways of thinking with new approaches. It is all the more gratifying when the process succeeds and achievements are also recognised by our partners, politicians and the general public. This section showcases a selection of ZSW research topics in 2024.



ECOLYZER GEHT IN BETRIEB

Die im Jahr 2021 begonnene Kooperation mit der Fa. Ecoclean aus Filderstadt trägt Früchte. Ecoclean hat die vom ZSW entwickelte Elektrolysesystemtechnik für die alkalische Wasserelektrolyse in ein serientaugliches Produkt überführt. Weniger als drei Jahre nach dem Beginn des Know-how-Transfers ging der Prototyp, der sog. EcoLyzer, mit einer Anschlussleistung von 1 MW, im Sommer 2024 in Betrieb.

ECOLYZER GOES INTO OPERATION

The cooperation with Ecoclean, a company based in Filderstadt, began in 2021 and is now bearing fruit. Ecoclean has converted electrolysis system technology for alkaline water electrolysis – developed by the ZSW – into a product suitable for series production. The prototype with a connected load of 1 MW, known as the EcoLyzer, went into operation in the summer of 2024, less than three years after the start of the knowledge transfer process.

Erster Serienprototyp des »EcoLyzer« in der Leistungsklasse 1 MW.

First series prototype of the »EcoLyzer« in the 1 MW power class.



AUF DEM WEG ZU STABILEN PEROWSKITMODULEN

Perovskitsolarzellen sind eine sehr vielversprechende Photovoltaiktechnologie, u. a. auch für Tandemsolarzellen. Eine der Herausforderungen ist die Langzeitstabilität über möglichst 20-30 Jahre. Um diese zu untersuchen, wurden im Fachgebiet MAT beschleunigte Alterungstests durchgeführt. Neben Messungen unter Dauerbeleuchtung und Tests in der Klimakammer bei 85 °C und 85 % Luftfeuchte waren seit über einem Jahr auch Perovskitmodule im Outdoor-Test. Dabei erwiesen sich Module mit semitransparentem Rückkontakt (z. B. aus Indiumzinkoxid) als besonders stabil und zeigten auch nach über einem Jahr noch über 80 % des initialen Wirkungsgrades (siehe Abbildung unten), was die positiven Entwicklungen der Perovskittechnologie unterstreicht. Alle Beschichtungen sowie die Modulverschaltung und Verkapselung wurden im Fachgebiet MAT durchgeführt. Die gezeigten Outdoormessungen stammen von einem Testfeld in Berlin, können zukünftig aber auch auf dem ZSW-Testfeld Widderstall erfolgen.

ON THE WAY TO STABLE PEROVSKITE MODULES

Perovskite solar cells are a very promising photovoltaic technology, including for tandem solar cells. One of the challenges is long-term stability, preferably over 20–30 years. This was the subject of accelerated ageing tests in the MAT department. Measurements were taken under continuous lighting, tests were carried out in the climate chamber at 85°C and 85% humidity, and perovskite modules were also tested outdoors for over a year. Modules with semi-transparent back contacts (e.g. made of indium zinc oxide) proved to be particularly stable and still boast over 80% of the initial efficiency even after over a year (see figure below), underlining the positive developments in perovskite technology. All the coating work, module wiring and encapsulation were carried out in the MAT department. The outdoor measurements on the graph come from a test site in Berlin but can also be carried out on the ZSW Widderstall test site in the future.



Relativer Wirkungsgrad aus 13 Monaten Outdoormessung eines semitransparenten Perovskitmoduls.

Relative efficiency over 13 months of outdoor measurement of a semi-transparent perovskite module.



Fällanlage zur Herstellung von Aktivmaterialien für Natrium-Ionen-Batterien.

Precipitation plant for the production of active materials for sodium-ion batteries.

NATRIUM STATT LITHIUM

Ohne Lithium-Ionen-Batterien keine Energiewende. Sie ermöglichen hohe Reichweiten und speichern überschüssigen grünen Strom. Alternativen waren lange nicht in Sicht, doch nun drängen Natrium-Ionen-Batterien auf den Markt. Diese sind bereits erhältlich, erreichen aber noch nicht die Performance und Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien. Dennoch werden sie intensiv beforscht, weil sie ohne das knappe Metall Lithium auskommen und stattdessen Natrium einsetzen, das z. B. aus Kochsalz oder aus dem Meerwasser gewonnen werden kann. Zudem benötigen sie keine giftigen Schwermetalle wie Nickel oder Cobalt und auch auf teure Stromableiter aus Kupfer kann verzichtet werden. Das ZSW ist aktuell in vier großen bundesweiten Forschungsprojekten zu dieser Technologie aktiv und war als Initiator des Projekts »Transition« vor vier Jahren sogar das erste F&E-Institut in Deutschland, das sich mit dieser neuen Batterietechnologie beschäftigt hat.

SODIUM REPLACING LITHIUM

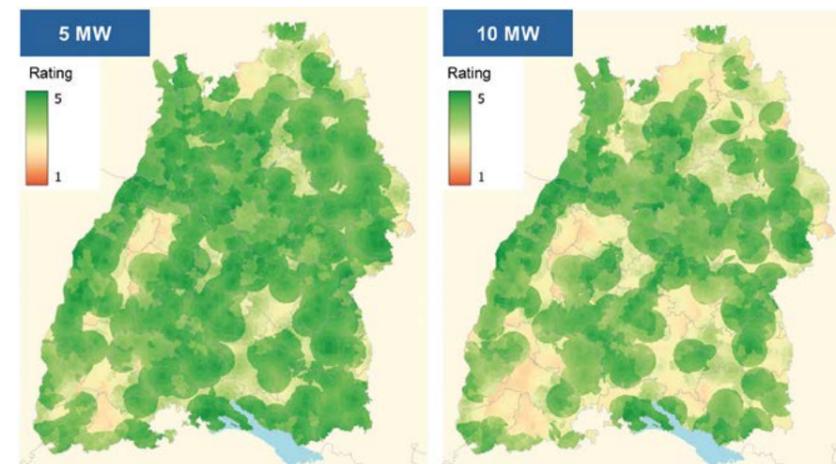
There is no energy transition without lithium-ion batteries. They enable long ranges and store surplus green electricity. For a long time, there were no alternatives in sight, but sodium-ion batteries are now making headway. They are already on the market but are yet to match the performance and service life of lithium-ion batteries. They are very interesting, however, because lithium is scarce and they replace this with sodium which can be extracted from common salt or seawater, for example. Nor do they require toxic heavy metals like nickel or cobalt, and there is also no need for expensive copper conductors. The ZSW is currently involved in four major nationwide research projects on this technology and, having initiated the »Transition« project four years ago, it was even the first R&D institute in Germany to work on this new battery technology.

FACHDIALOG WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR – PRÄSENTATION VON H2OPTIMIST

Im Rahmen des siebten Fachdialogs Wasserstoffinfrastruktur am 17.12.2024 stellte das ZSW gemeinsam mit dem Fraunhofer ICT ein im Projekt H2OptimiSt, gefördert vom Umweltministerium Baden-Württemberg, entwickeltes GIS-basiertes Analyseraster zur beschleunigten Standortfindung für H₂-Hubs vor. Die Zusammenschau der Einzelanalysen der jeweiligen Standortfaktoren bestätigt eindrucksvoll, dass die Entwicklung von H₂-Hubs unterschiedlicher Leistungsklassen (5 bis 20 MW) für Baden-Württemberg eine No-Regret-Strategie ist, mit der kurzfristig steigende H₂-Bedarfe gedeckt, das Stromsystem entlastet und lokale Wertschöpfung generiert werden können. Sie garantieren zudem langfristig im Zusammenspiel mit der wachsenden H₂-Pipelineinfrastruktur ein sehr hohes Maß an Versorgungssicherheit – ein wichtiger Faktor für die Attraktivität und Wettbewerbsfähigkeit von Baden-Württemberg als Wirtschaftsstandort.

DISCUSSION FORUM ON HYDROGEN INFRASTRUCTURE – PRESENTING H2OPTIMIST

The ZSW and the Fraunhofer ICT attended the seventh discussion forum on hydrogen infrastructure on 17 December 2024 and presented a GIS-based analysis model for accelerated identification of locations for H₂ hubs in the H2OptimiSt project, which is funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment. The synopsis of the individual analyses of the various site-related factors offers striking confirmation that the development of H₂ hubs of different performance classes (5 to 20 MW) is a no-regret strategy for Baden-Württemberg, allowing increasing H₂ demands to be met in the short term and making it possible to relieve the strain on the electricity system and generate added value at local level. They also guarantee, in conjunction with the growing H₂ pipeline infrastructure, a very high degree of supply security in the long term – a key factor in making Baden-Württemberg attractive and competitive as a location for business.



Exemplarische Standortbewertung für H₂-Hubs für das Jahr 2030.

Example assessment of locations for H₂ hubs for the year 2030.

DIE ZUKUNFT NEUER PHOTOVOLTAIK-MATERIALIEN BEREITS HEUTE MITDENKEN

Das ZSW hat zusammen mit Partnern im Rahmen des Photovoltaik Power Systems-Programms (PVPS) der Internationalen Energie Agentur (IEA) im März 2024 einen Bericht zum aktuellen Stand des Recyclings von PV-Modulen in Deutschland veröffentlicht. Aufgrund der hohen Ausbaugeschwindigkeit von PV-Anlagen wird es zunehmend wichtiger, das End-of-Life-Management effizient und industrietauglich zu gestalten.

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist es auch notwendig, bereits im Anfangsstadium eines neuen Materials dessen Recyclingfähigkeit zu erforschen, wie z. B. für PV-Module aus Perowskit. Wie sich die Dünnschichtsolarmodule nach Ablauf ihrer Lebensdauer wiederverwenden lassen, untersucht das Fachgebiet MAT nun gemeinsam mit zwei Industriepartnern. Im von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt »Pero Cycle« wird ein industrietaugliches Recyclingverfahren entwickelt.

ENGAGING IN THE PRESENT DEBATE ON THE FUTURE OF NEW PHOTOVOLTAIC MATERIALS

The ZSW and its partners published a report in March 2024 on the current status of recycling of PV modules in Germany in the wider context of the Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS) adopted by the International Energy Agency (IEA). Given the high rate of expansion of photovoltaic systems, it is becoming increasingly important to enhance end-of-life management in terms of its efficiency and industrial viability.

The circular economy is also front and centre when it comes to new materials, dictating the need for research into their recyclability in the early stages of development, as with PV modules made of perovskite, for example. The MAT department is now working with two industry partners to investigate how end-of-life thin-film solar modules can be reused. An industrially viable recycling process is under development in the »PeroCycle« project, which is funded by the German Federal Environmental Foundation (Deutsche Bundesstiftung Umwelt – DBU).

GENERISCHER BRENNSTOFFZELLENSTACK – ENTWICKLUNGSPLATTFORM FÜR DIE INDUSTRIE

In Zusammenarbeit zwischen dem ZSW und dem Industriepartner EKPO Fuel Cell Technologies wurde ein Design für einen generischen Brennstoffzellenstack (BZ) als offene Forschungs- und Entwicklungsplattform im Rahmen des Projekts HyFaB realisiert. Alle Stackkomponenten wurden hierbei vom ZSW entworfen und in Prototypen umgesetzt. Stackgröße und die Leistungsdichte entsprechen den heute im mobilen Anwendungsbereich eingesetzten BZ-Systemen mit einer Leistung von bis zu 150 kW.

Alle relevanten Teile des Zelldesigns wurden mittels geeigneter CFD (Computational Fluid Dynamics)-Simulationen untersucht. Inzwischen wurden ein auf die Bipolarplatten abgestimmtes Balance-of-Stack-Konzept sowie eine Anschlussvorrichtung für die Anbindung an den Teststand entwickelt. Im Berichtsjahr wurden zahlreiche Versuchs- und Kundenstacks aufgebaut und getestet sowie eine vollständige Dokumentation zum Stackdesign erstellt und veröffentlicht. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten haben die Partner des ZSW vollen Zugriff auf diesen Stack und dessen Komponenten.

GENERIC FUEL CELL STACK – DEVELOPMENT PLATFORM FOR THE INDUSTRY

The ZSW and its industrial partner EKPO Fuel Cell Technologies worked together on a design for a generic fuel cell (FC) stack as an open research and development platform, based on the brief for the preliminary project and the HyFaB project. All the stack components were designed by the ZSW and developed through to the prototype stage. The stack size and power density meet the standards for the FC systems used today in mobile applications and configured for an output of up to 150 kW.

All the relevant parts of the cell design were examined by means of suitable CFD simulations, with a balance-of-stack arrangement tailored to the bipolar plates and the development of a device for connection to the test rig.

In the year under review, many test stacks and customer stacks were set up and tested, accompanied by the formulation and publication of full documentation on the stack design. The ZSW partners have full access to these components in the context of research and development projects.



Über 60 Teilnehmende aus aller Welt beim ISESA.

Over 60 delegates from all over the world at ISESA.

1st INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY SYSTEM ANALYSIS (ISESA)

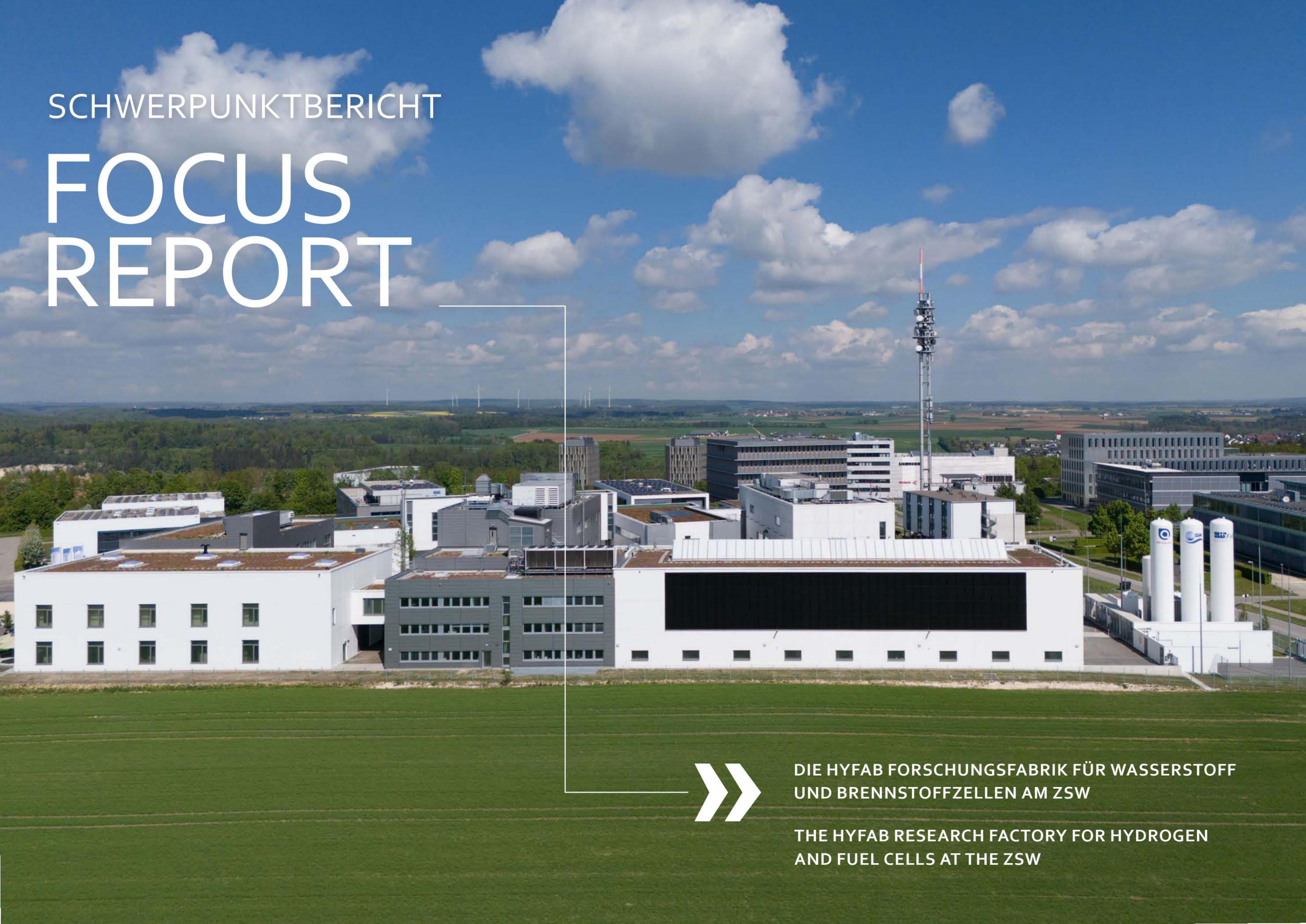
Zum Thema »Next Level of security of supply: a resilience strategy for the energy transition« folgten mehr als 60 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am 11. und 12. November 2024 der Einladung der Stuttgart Research Partnership on Integrated System Analysis for Energy (STRise) zum ersten internationalen Symposium der Energiesystemanalyse. 16 Vorträge und eine Postersession beleuchteten die Herausforderungen des zukünftigen dekarbonisierten Energiesystems: von konzeptionellen Arbeiten zur Resilienz über Modellanalysen auf den unterschiedlichsten Ebenen vom Quartier bis zum europäischen Energiesystem, Ergebnisse empirischer Datenerhebungen, etwa zum Nutzerverhalten und zur Akzeptanz aktiver Prosumerrollen, bis hin zu geopolitischen Aspekten wie der Abhängigkeit Europas von seltenen Rohstoffen. Das positive Feedback motiviert zur Wiederholung.

1st INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY SYSTEM ANALYSIS (ISESA)

More than 60 research scientists accepted the invitation to the 1st International Symposium on Energy System Analysis (ISESA) issued by the Stuttgart Research Partnership on Integrated System Analysis for Energy (STRise). The event was held on 11 and 12 November 2024 and the keynote subject was »Next level of security of supply: a resilience strategy for the energy transition«. A total of 16 lectures and a poster session highlighted the challenges surrounding the future decarbonised energy system, from theoretical studies on resilience, model analyses at the various levels from the district neighbourhood to the European energy system, collections of empirical data on issues like user behaviour and the acceptance of active prosumer roles, right through to geopolitical aspects, such as Europe's dependence on rare raw materials. The positive feedback is a source of motivation for a repeat gathering.

SCHWERPUNKTBERICHT

FOCUS REPORT



**DIE HYFAB FORSCHUNGSFABRIK FÜR WASSERSTOFF
UND BRENNSTOFFZELLEN AM ZSW**

**THE HYFAB RESEARCH FACTORY FOR HYDROGEN
AND FUEL CELLS AT THE ZSW**

MOBILITÄT MIT ZUKUNFT AUS BADEN- WÜRTTEMBERG



MOBILITY WITH A FUTURE FROM BADEN- WÜRTTEMBERG

Grüner Wasserstoff ist nicht mehr Vision, sondern bereits Realität. Er wird eine tragende Säule der zukünftigen Energiewirtschaft sein, die ganz ohne Emissionen von Kohlendioxid auskommen wird. Wasserstoff und seine Folgeprodukte werden in vielen Anwendungen zu finden sein – auch in der Mobilität zu Lande, zu Wasser und in der Luft.

Green hydrogen is no longer a mere vision; it is already a reality. It will be a key pillar of the future energy industry, which will be completely free of carbon dioxide emissions. Hydrogen and its derivatives will be found in many applications – including in land, water and air-based mobility.

Das ZSW entwickelt seit über 35 Jahren Technologien für die Erzeugung und den Einsatz von Wasserstoff. Was einst Forschung mit unklarer kommerzieller Perspektive war, entwickelte sich im Bereich Elektrolyse und Brennstoffzellen zu ausgereiften und marktfähigen Technologien. Der Forschungsfokus hat sich somit auch hin zur Industrialisierung verschoben. Am ZSW in Ulm wurde dafür die Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff (HyFaB) geschaffen, die nach dreijähriger Bauzeit in Betrieb gegangen ist.

HyFaB unterstützt die Entwicklung und Industrialisierung von PEM-Brennstoffzellen. Dazu gehören ein Brennstoffzellen-Testzentrum und die Entwicklung innovativer Fertigungsmethoden. Sowohl Komponenten als auch komplette Stacks werden angeboten – ebenso wie die Ausbildung von Fachkräften, insbesondere durch Seminare und Schulungen für KMU.

The ZSW has been developing technologies to facilitate the production and use of hydrogen for over 35 years. Once subjects of research with unclear market prospects, these technologies have now matured to the point of commercial viability in the fields of electrolysis and fuel cells. The research focus has increasingly shifted towards industrial roll-out. Our research factory for fuel cells and hydrogen (HyFaB) was built at the Ulm site for this purpose and went in operation after three years of construction.

HyFaB supports the development and industrialisation of PEM fuel cells. This includes a fuel cell test center and the development of innovative manufacturing methods. It offers both individual components and complete stacks, as well as specialist training, particularly through seminars and training courses for SMEs.



GRÜNER STROM UND GRÜNER WASSERSTOFF: RÜCKGRAT DER ENERGIEWENDE

Deutschland soll bis 2045 klimaneutral sein. Grüner Strom und grüner Wasserstoff werden das Rückgrat der zukünftigen Energieversorgung bilden. Elektrische Energie aus Wind und Photovoltaik wird zur kostengünstigsten Energiequelle, die allerdings bevorzugt dann genutzt werden muss, wenn sie erzeugt wird.

Die Speicherung großer Mengen überschüssiger elektrischer Energie in Batterien wird zunehmend Realität, da die Kosten für Lithium-Ionen-Batteriesysteme in den letzten Jahren deutlich gesunken sind. Dennoch bleiben Batteriespeicher vergleichsweise teuer und sind wirtschaftlich vor allem sinnvoll, wo Energie regelmäßig ein- und gespeichert wird – etwa zur Netzstabilisierung oder zur Nutzung von tagsüber erzeugter und gespeicherter Solarenergie am Abend und in der Nacht.

Um große Strommengen über längere Zeiträume zu speichern und saisonale Schwankungen zwischen regenerativer Stromerzeugung und Strombedarf auszugleichen, wird Wasserstoff als molekularer Speicher unverzichtbar werden. Er wird die heutigen Energiemoleküle wie Methan (Erdgas) und flüssige Kohlenwasserstoffe (Benzin, Diesel) ablösen.

Grüner Wasserstoff wird primär durch die Elektrolyse von Wasser unter Einsatz von grünem Strom hergestellt. Er wird künftig ein weltweit gehandelter und in großen Mengen bevorrateter Energieträger sein und so eine zentrale Rolle in der globalen Energieversorgung übernehmen. In vielen Bereichen wie der Chemieindustrie, der Stahlproduktion und der Zementindustrie hat Wasserstoff enormes Potenzial, aber auch in der Mobilität, insbesondere zur Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs.

GREEN ELECTRICITY AND GREEN HYDROGEN: THE BACKBONE OF THE ENERGY TRANSITION

Germany aims to be climate-neutral by 2045. Green electricity and green hydrogen will form the backbone of the future energy supply. Electricity from wind and photovoltaics is becoming the most cost-effective energy source. However, it should ideally be used at the time of its generation.

Storing large amounts of excess electrical energy in batteries is slowly becoming a reality because the costs of lithium-ion battery systems have fallen significantly in recent years. Battery storage devices are still comparatively expensive, however, and are economically viable primarily where energy is regularly taken into and out of storage – for grid stabilisation, for example, or for the evening and night-time use of solar energy generated and stored during the day.

Hydrogen will become indispensable as a molecular storage medium, making it possible to store large amounts of electricity over longer periods of time and balance out seasonal fluctuations between renewable electricity generation and demand. It will replace today's molecular energy vectors like methane (natural gas) and liquid hydrocarbons (petrol, diesel).

Green hydrogen is primarily produced by the electrolysis of water using green electricity. In the future, it will be a globally traded energy source and will be stored in large quantities, taking on a central role in the global energy supply. Hydrogen has enormous potential in many sectors, such as the chemical industry, steel production and the cement industry. This also applies to mobility, particularly for the decarbonisation of heavy goods traffic.



Der neue Seminarbereich am ZSW in Ulm: Mit HyFaB setzt das ZSW auf die Schulung von Experten.

The new seminar area at the ZSW in Ulm: At HyFaB, the ZSW is committed to providing training for experts.

PEM-BRENNSTOFFZELLEN: EMISSIONSFREIE LÖSUNG FÜR VIELE SEKTOREN

Brennstoffzellen wandeln die chemische Energie von Wasserstoff und Luftsauerstoff effizient in elektrische Energie um. Im Vergleich zu anderen Brennstoffzellentechnologien überzeugt die PEM-Brennstoffzelle (Polymer Elektrolyt Membran) durch ihre hohe Leistungsdichte und die Vielseitigkeit der Anwendungen. Sie findet Anwendung in Mobilität, Industrie und Energieversorgung, um zukünftige Energiebedarfe klimaneutral zu decken:

- **Verkehr:** Brennstoffzellenfahrzeuge bieten eine Lösung für emissionsfreie Mobilität mit mittleren und schweren Nutzfahrzeugen (>20 t), Bussen, Bahnen und Flugzeugen.
- **Industrie:** Brennstoffzellen eignen sich für die dezentrale Energiebereitstellung und als Notstromversorgung.
- **Energieversorgung:** Brennstoffzellen können zur gekoppelten Wärme- und Stromversorgung eingesetzt werden.

Der Brennstoffzellenstack (engl. für Stapel) ist das Herzstück des Brennstoffzellensystems und besteht aus mehreren hundert Einzelzellen. Brennstoffzellen haben heute eine technologische Reife erreicht, so dass sie problemlos in den oben genannten Anwendungen eingesetzt werden können. Was noch fehlt, ist eine effiziente und kostengünstige Technologie zur Massenproduktion sowie eine breit aufgestellte Zulieferer- und Maschinenbauindustrie.

Heute können bereits nahezu alle Komponenten einer Brennstoffzelle und alle notwendigen Fertigungsmaschinen in Deutschland erworben werden. Es gilt nun zusammen mit diesen industriellen Partnern die Fertigung von Brennstoffzellen schnell zu industrialisieren. Damit kann ein großer Beitrag für die Energiewende geleistet werden – und zwar »Made in Germany«.

PEM FUEL CELLS: ZERO-EMISSION SOLUTION FOR MANY SECTORS

Fuel cells efficiently convert the chemical energy of hydrogen and atmospheric oxygen into electrical energy. In comparison with other fuel cell technologies, polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells offer impressively high power density and versatility. This technology is used in mobility, industry and energy supply systems to cover energy demand in a climate-neutral manner:

- **Transport:** Fuel cell vehicles offer a solution for zero-emission mobility with medium-duty and heavy-duty commercial vehicles (>20 t), buses, trains and aircraft.
- **Industry:** Fuel cells are suitable for use in distributed and emergency power supply systems.
- **Energy supply:** Fuel cells can support combined heat and power (CHP) systems.

The fuel cell stack is the heart of the fuel cell system and consists of several hundred individual cells. Fuel cells have now reached a sufficient level of technological maturity today to be used without any problems in the aforementioned applications. There is, however, still a need for an efficient and cost-effective technology for mass production and a broad supplier network and mechanical engineering industry base.

Yet, almost all the components and production machinery are already available to purchase in Germany. The aim is now to quickly ramp up fuel cell production in tandem with these industrial partners. This can make a major contribution to the energy transition – a contribution »Made in Germany«.



Brennstoffzellen-System für LKW.

Truck fuel cell system.



Die Tatsache, dass das ZSW in Ulm heute das europaweit größte unabhängige Brennstoffzellenentwicklungszentrum betreibt, verdankt es auch der großzügigen finanziellen Förderung durch den Bund und das Land Baden-Württemberg.

The fact that the ZSW in Ulm now operates the largest independent fuel cell development centre in Europe is due in part to generous financial support from the German government and the state of Baden-Württemberg.

GEMEINSAM FÜHREND IM VERBUND DER INDUSTRIENAHEN BRENNSTOFFZELLENFORSCHUNG

Das ZSW in Ulm forscht seit über 35 Jahren an Brennstoffzellenstacks mit Leistungen bis 200 kW. Mit der HyFaB-Forschungsfabrik hat das ZSW seine Expertise in der Brennstoffzellenforschung auf ein neues Niveau gehoben und ist heute europaweit führend in der industrieorientierten Brennstoffzellenforschung. Die HyFaB unterstützt dabei auch insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen beim Einstieg in die industrielle Fertigung. Die HyFaB ist eine gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsplattform des ZSW in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg und dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA). Sie umfasst Investitionen von über 90 Millionen Euro, darunter einen Großteil an Fördermitteln des Bundesverkehrsministeriums, des Umwelt- und des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg sowie Eigenmittel. An den Standorten Ulm und Freiburg entstanden neue Gebäude und Großgeräte, die die Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der Brennstoffzellentechnologie nun entscheidend vorantreiben.

JOINING FORCES WITH INDUSTRY TO LEAD THE WAY IN FUEL CELL RESEARCH

The ZSW in Ulm has been conducting research for over 35 years into fuel cell stacks with outputs of up to 200 kW. The HyFaB research factory has elevated the ZSW's expertise in fuel cell research to a new level, securing a leading position Europe-wide in industry-oriented fuel cell research. HyFaB also singles out small and medium-sized enterprises for support with the process of entering industrial production. HyFaB is a joint research and development platform operated by the ZSW in cooperation with the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE in Freiburg and the German Machinery and Equipment Manufacturers Association (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. – VDMA). Capital investment stands at over 90 million euro, with a large percentage of funding coming from the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV), the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, the Baden-Württemberg Ministry of Climate Action and internal funds. New buildings were constructed and large-scale equipment installed at sites in Ulm and Freiburg, which are now making a decisive contribution to the development and commercialisation of fuel cell technology.



Entwicklung von automatisierten Produktionsprozessen für Hochleistungsbrennstoffzellen.

Development of automated production processes for high-performance fuel cells.

HYFAB – MEHR ALS EINE FORSCHUNGSFABRIK

In der HyFaB arbeiten Industrie und Wissenschaft als Wertschöpfungsgemeinschaft eng zusammen, um eine effiziente und skalierbare Produktion von PEM-Brennstoffzellensystemen voranzutreiben.

Hier bringen etablierte Industrieunternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau sowie aus der Zulieferindustrie ihre Kernkompetenzen ein und entwickeln diese gemeinsam weiter. Neuen Akteuren bietet die HyFaB eine offene Einstiegs- und Entwicklungsplattform. In enger Zusammenarbeit mit der Wissenschaft wird so der Weg geebnet, um kostengünstige Lösungen für die Massenproduktion zugänglich zu realisieren.

Um die Kosten von Brennstoffzellen langfristig zu senken, ist die Industrialisierung der Montage von Brennstoffzellenstacks sowie der Produktion der benötigten Komponenten entscheidend. Die HyFaB setzt genau an diesem Punkt mit drei zentralen Schwerpunkten an:

- **Optimierung von Herstellprozessen:** Fokus auf Qualität, Effizienz und minimalen Ressourcenverbrauch.
- **Bereitstellung von Musterteilen:** Entwicklung und Test von Stackkomponenten sowie von kompletten Stack, die als »generischer Stack« für Unternehmen und Forschungseinrichtungen zur Verfügung stehen.
- **Aus- und Weiterbildung:** Unterstützung von Firmen, die die Transformation vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzellentechnologie vollziehen – durch Seminare, Workshops und Nutzung der Anlagen.

Es ist ebenso wichtig zu betonen, was die HyFaB **nicht** ist:

Sie ist keine durchsatzoptimierte Produktionsstätte mit hohen Ausstoßraten und einer kommerziellen Vermarktung der hergestellten Produkte. Statt hoher Durchsatzraten stehen andere, grundsätzlichere Fragestellungen im Vordergrund. Ein Beispiel: Muss die Fertigung zwingend in teuren Reinräumen erfolgen oder reicht eine kostengünstigere, konditionierte Umgebung? Müssen Spaltmaße auf Mikrometer genau eingehalten werden? Antworten auf solche Fragen können Produktionskosten zukünftig erheblich senken und die Technologie wirtschaftlicher machen.

Die HyFaB ist somit ein zentraler Baustein in Deutschland für den Hochlauf der Brennstoffzellentechnologie und die Transformation zur klimaneutralen Mobilität.



^ Das neue Brennstoffzellen-Testzentrum in HyFaB.

^ New fuel cell test centre at HyFaB.

v Die HyFaB verfügt über ein Labor für Spurenanalytik in Wasserstoff und Wasser.

v HyFaB has a laboratory for analysis of trace impurities in hydrogen and water.



HYFAB: MORE THAN A RESEARCH FACTORY

At HyFaB, industry and science work hand-in-hand in a value-creating alliance to expedite the efficient and scalable production of PEM fuel cell systems.

Long-established industrial enterprises from the mechanical and plant engineering sector and the supplier industry engage and contribute in their focus areas while jointly furthering their expertise. HyFaB has opened up a platform for entry and development for new players, paving the way, in close cooperation with science, for the rapid roll-out of cost-effective solutions for mass production.

The commercialisation of fuel cell stack assembly and the production of the necessary components are decisive to achieving long-term reductions in fuel cell costs. This is precisely where HyFaB comes in with three central focal points:

- **Optimisation of manufacturing processes:** Focus on quality, efficiency and minimum resource consumption.
- **Provision of sample parts:** Development and testing of stack components and complete stacks, which are also supplied to enterprises and research institutions as »generic stacks«.
- **Training and professional development:** Support for companies transitioning from combustion engine to fuel cell technology by way of seminars, workshops and use of the systems.

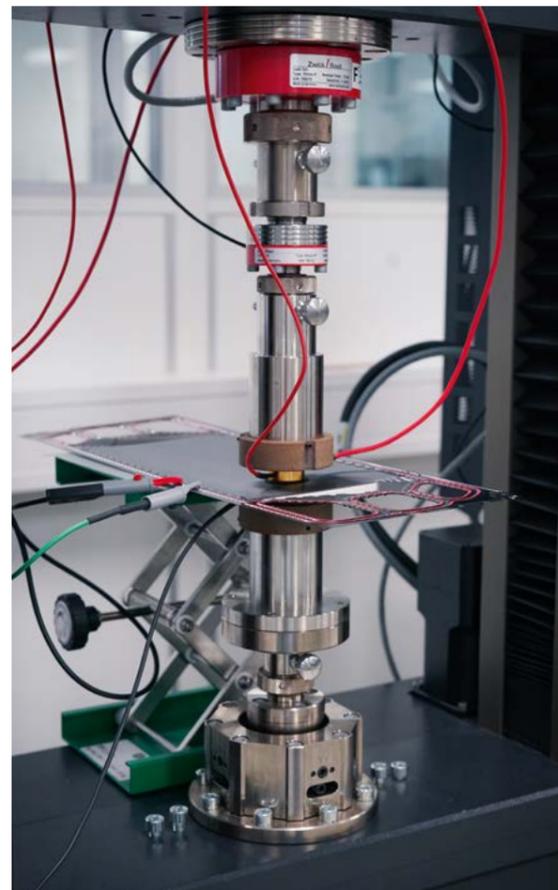
It is equally important to emphasise what HyFaB is **not**: it is not a throughput-optimised production facility with high output rates and commercial marketing of its products. The focus is not on high throughput rates but on other, more fundamental issues – for example, whether production requires expensive clean-rooms or whether a more cost-efficient, conditioned environment might suffice. Another example is whether gap widths between parts require precision right down to the nearest micrometre. Answers to such questions can significantly reduce production costs in the future and make the technology more economical. HyFaB is, therefore, a central building block for the ramp-up of fuel cell technology in Germany and the transformation to climate-neutral mobility.

IMPULSGEBER FÜR DEN MARKTHOCHLAUF

An der HyFaB des ZSW in Ulm laufen zahlreiche Forschungsprojekte, die sich mit Design und Optimierung von Stackkomponenten sowie der Entwicklung und Fertigung kompletter Brennstoffzellenstacks beschäftigen. Im vom Bundesverkehrsministerium geförderten Projekt H2Sky liegt der Fokus auf der Entwicklung von Brennstoffzellen für die Luftfahrt. Ziel ist ein leistungsfähiger Brennstoffzellenstack, der als Hauptantrieb in Flugzeugen eingesetzt werden kann. Gemeinsam mit Partnern entwickelt und testet das ZSW innovative Konzepte für Schlüsselkomponenten wie Membran-Elektroden-Einheiten und Bipolarplatten. Dabei liegt ein besonderer Schwerpunkt darauf, diese Komponenten für die hohen Anforderungen in der Luftfahrt zu entwickeln, zu optimieren und zu erproben. Weitere öffentlich geförderte HyFaB-Projekte mit Industrie- und ZSW-Beteiligung fokussieren sich auf die Erforschung von Produktionsbedingungen, Materialentwicklung und Qualitätskontrolle.

> [Siehe Infobox rechts](#) (Stand: 12/2024)

Auf der Forschungsseite kooperiert das ZSW insbesondere mit dem Fraunhofer ISE in Freiburg.



- **BI-FIT:** Einfahrprozedere von PEM-Brennstoffzellenstacks nach der Fertigung.
Partner: Fraunhofer ISE, EKPO Fuel Cell Technologies GmbH, Proton Motor Fuel Cell GmbH
- **R2MEA:** Rolle-zu-Rolle-Prozess vom Katalysator zur MEA (Katalysator, Katalysatorschicht, CCM, MEA).
Partner: 18 Fraunhofer-Institute, koordiniert über das Fraunhofer ISE, das Thema Stackbau erfolgt am ZSW.
- **STACK BASELINE:** Aufbau eines ersten generischen Stacks und Generierung einer elektrochemischen Baseline.
Partner: Fraunhofer ISE
- **REFERENZSTACK:** Einfluss der Fehlerbelastung bei der Stackfertigung/Arbeitsumgebung auf die Stackperformance.
Partner: GROB-WERKE GmbH & Co. KG
- **ROBO-MEA-PREP:** Roboterunterstützte Herstellung und Testung von Membran-Elektroden-Einheiten für Brennstoffzellen.
Partner: Forschungszentrum Informatik (FZI) und the high throughput experimentation company (hte GmbH)
- **MEA – EOL:** Entwicklung von End-of-Line-Verfahren für die Qualitätskontrolle von 7-lagigen MEAs.
Partner: Kirschenhofer Maschinen GmbH
- **MULTI DÜSE:** Neuartige Dichtungskonzepte für Bipolarplatten, Entwicklung mit neuen hydrolytischen Polymeren.
Partner: Rampf Production Systems
- **BAL-O-STACK:** Komponenten für den generischen Stack (Endplatten, Stackkompression, Zellspannungsaufnahme, on-line Impedanzmessungen).
Partner: Albert Handtmann Holding GmbH & Co. KG, Marquardt Management SE, GROB-WERKE GmbH & Co. KG, EKPO Fuel Cell Technologies GmbH
- **BPP – KONTAKTDRUCK:** Entwicklung und Prüfung unterschiedlicher Beschichtungen für metallische Bipolarplatten.
Partner: ASYS Group



CATALYST FOR MARKET RAMP-UP

The ZSW is running a number of research projects at its HyFaB facility in Ulm, focusing on the design and optimisation of stack components and on the development and production of complete fuel cell stacks. The H2Sky project, funded by the Federal Ministry for Digital and Transport, focuses on the development of fuel cells for aviation with a view to developing a powerful fuel cell stack that could be used as the main propulsion engine in aircraft. The ZSW is working with various partners on the development and testing of innovative designs for key components like membrane electrode assemblies and bipolar plates. One particular focus is developing, optimising and testing these components in line with the aviation sector's stringent specifications.

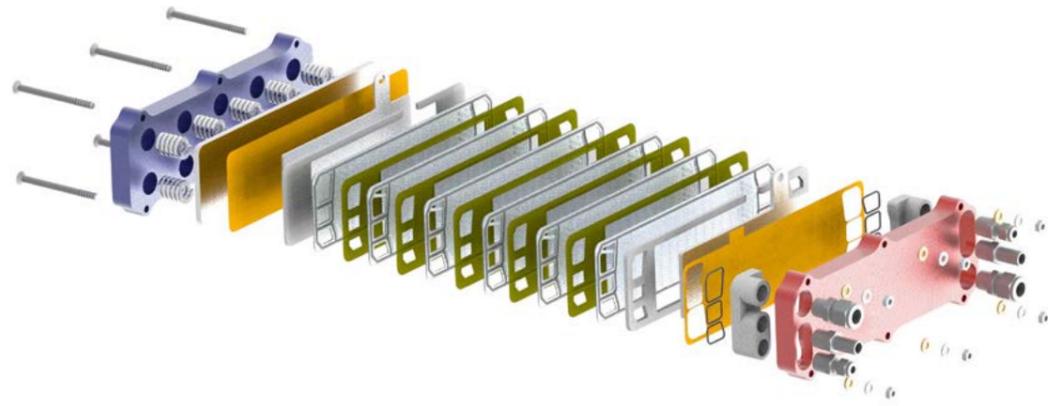
Other publicly funded HyFaB projects involving industry and the ZSW concern research into production conditions, material development and quality control.

> [See info box on the right](#) (as at 12/2024)

The ZSW collaborates extensively with Fraunhofer ISE Freiburg in its research activities.



- **BI-FIT:** Breaking-in procedure for PEM fuel cell stacks after production.
Partners: Fraunhofer ISE, EKPO Fuel Cell Technologies GmbH, Proton Motor Fuel Cell GmbH
- **R2MEA:** Roll-to-roll process from catalyst to MEA (catalyst, catalyst layer, CCM, MEA).
Partners: 18 Fraunhofer institutes coordinated by Fraunhofer ISE, with stack assembly at the ZSW
- **Stack Baseline:** Construction of a first generic stack and generation of an electrochemical baseline.
Partner: Fraunhofer ISE
- **Reference Stack:** Influence of incorrect loading during stack production/working environment on stack performance.
Partner: GROB-WERKE GmbH & Co. KG
- **Robo-MEA-Prep:** Robot-assisted manufacturing and testing of membrane electrode assemblies for fuel cells.
Partners: Forschungszentrum Informatik (FZI) and the high throughput experimentation company (hte GmbH)
- **MEA – EOL:** Development of end-of-line processes for quality control of 7-layer MEAs.
Partner: Kirschenhofer Maschinen GmbH
- **Multi Nozzle:** New sealing concepts for bipolar plates and development work with new hydrolytic polymers.
Partner: Rampf Production Systems
- **Bal-O-Stack:** Components for the generic stack (end plates, stack compression, cell voltage recording, on-line impedance measurements).
Partners: Albert Handtmann Holding GmbH & Co. KG, Marquardt Management SE, GROB-WERKE GmbH & Co. KG, EKPO Fuel Cell Technologies GmbH
- **BPP – Contact Pressure:** Development and testing of different coatings for metallic bipolar plates.
Partner: ASYS Group



CAD-Konstruktion:
Aufbau eines Brennstoffzellenstacks.

CAD design:
The structure of
a fuel cell stack.

BRENNSTOFFZELLENSTACKS: FUNKTION, AUFBAU UND KOMPONENTEN

Im Betrieb der Brennstoffzelle fließt Wasserstoff auf die Anodenseite des Stacks und wird dort durch den Katalysator in Protonen und Elektronen getrennt. Die Protonen (positiv geladene Wasserstoffatome) wandern durch die Protonen-Austausch-Membran (engl. Proton Exchange Membrane (PEM)) zur Kathodenseite, während die Elektronen über einen externen Stromkreis fließen und elektrische Energie liefern. Auf der Kathodenseite reagieren Protonen, Elektronen und Sauerstoff zu Wasser. Mehrere dieser Zellen werden zu einem Stack (engl. für Stapel) hintereinandergeschaltet, um zusätzlich zu den hohen Strömen auch hohe Spannungen zu generieren. Die Produktion solcher Stacks erfolgt heute noch überwiegend teilautomatisiert in Kleinserien.

Ein Brennstoffzellenstack besteht aus diesen Komponenten:

- **Membran-Elektroden-Einheit (MEA):** Die zentrale Einheit aus einer Protonen-Austausch-Membran (PEM) und Katalysatorschichten, in der Wasserstoff- und Sauerstoffreaktionen stattfinden und Strom erzeugt wird.
- **Gasdiffusionsschichten (GDL):** Sie verteilen die Reaktionsgase gleichmäßig auf die Katalysatoren und leiten das Reaktionsprodukt Wasser und Wärme ab.
- **Bipolarplatten (BPP):** Sie leiten den elektrischen Strom weiter und führen die Gase durch Kanäle zwischen den Zellen. Sie bestehen meist aus korrosionsbeständigem Edelstahl oder graphithaltigen Verbundwerkstoffen.
- **Dichtungen:** Sie sorgen dafür, dass die Gase in den richtigen Kanälen bleiben und nicht entweichen.
- **Endplatten und Pressmechanismen:** Sie halten den Stack zusammen und sorgen für gleichmäßigen Anpressdruck, um Dichtheit und Leistung des Stacks zu gewährleisten.

FUEL CELL STACKS: FUNCTION, STRUCTURE AND COMPONENTS

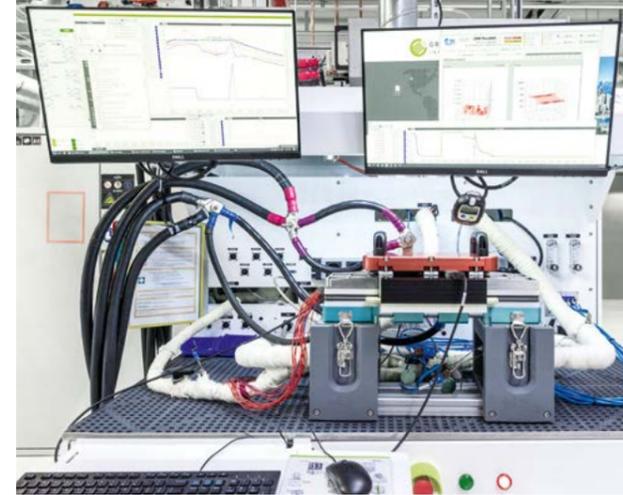
When the fuel cell is in operation, hydrogen flows to the anode side of the stack, where it is separated by the catalyst into protons and electrons. The protons (positively charged hydrogen atoms) migrate through the proton exchange membrane (PEM) to the cathode side while the electrons flow through an external circuit and provide electrical energy. On the cathode side, protons, electrons and oxygen react to form water. Several of these cells are connected in series to form a stack in order to generate high voltages in addition to high currents. Most stacks of this kind are still produced today in small batches in semi-automated processes.

A fuel cell stack consists of the following components:

- **Membrane electrode assembly (MEA):** The central unit, made up of a proton exchange membrane (PEM) and catalyst layers, in which hydrogen and oxygen reactions take place and electricity is generated.
- **Gas diffusion layers (GDLs):** These layers distribute the reaction gases evenly over the catalysts and dissipate the reaction product water and heat.
- **Bipolar plates (BPPs):** These components pass on the electrical current and guide the gases through channels between the cells. They are usually made of corrosion-resistant stainless steel or composite materials containing graphite.
- **Seals:** These are responsible for ensuring that the gases stay in the right channels and do not escape.
- **End plates and pressing mechanisms:** They hold the stack together and ensure even contact pressure in order to guarantee the tightness and performance of the stack.



Die HyFaB-Forschungsfabrik beschleunigt die Industrialisierung der PEM-Brennstoffzellentechnologie durch innovative Maschinen, automatisierte Prozesse, einen »generischen Stack«, Standards und Schulungen.



Der »Generische Stack« als Kurzstack im Teststand und als Voll-Stack mit 100 kW, bestehend aus 332 Einzelzellen.

The »generic stack« as a short stack on the test rig and as a full stack with 100 kW output, consisting of 332 individual cells.

DER »GENERISCHE BRENNSTOFFZELLENSTACK«

Hauptaufgabe der HyFaB ist es, die Grundlagen für die Großserienproduktion von Brennstoffzellen zu schaffen. Dazu dient ein herstellerunabhängiger (generischer) Brennstoffzellenstack als offene Entwicklungsplattform, um Zulieferern und neuen Marktteilnehmern den Einstieg in den Markt zu erleichtern. Unternehmen, beispielsweise aus dem Maschinen- und Anlagenbau, können hiermit schnell erste Erfahrungen mit Brennstoffzellen sammeln.

In Zusammenarbeit mit der EKPO Fuel Cell Technologies GmbH hat das ZSW einen generischen PEM-Brennstoffzellenstack entwickelt. Mit einer Leistung bis 150 kW entspricht er den Anforderungen moderner mobiler Anwendungen. Dieser Stack hat sich als Standardplattform in der deutschen Forschungslandschaft etabliert und wird bereits in zahlreichen Kundenprojekten genutzt.

THE »GENERIC FUEL CELL STACK«

The main brief for HyFaB is to create the basis for the large-scale production of fuel cells. In this context, a manufacturer-independent (generic) fuel cell stack serves as an open development platform, making it easier for suppliers and new players to enter the market. It enables companies in different sectors, such as mechanical and plant engineering, to swiftly gain initial experience with fuel cells.

The ZSW collaborated with EKPO Fuel Cell Technologies GmbH on the development of a generic PEM fuel cell stack. With an output of up to 150 kW, it meets the requirements of modern mobile applications. This stack has become established as the standard platform in the German research environment and is already being used in a number of customer projects.



Konstruktions- und Performanceinfos sowie Datensatz für Simulationen ergänzend zur Hardware

Design and performance information and simulation data sets in addition to hardware

zenodo.org/records/14223364

The HyFaB research factory is accelerating the industrial roll-out of PEM fuel cell technology through innovative machinery, automated processes, a »generic stack«, standards and training courses.

FERTIGUNG VON MEAS MIT 7-LAGEN-STRUKTUR

Die Membran-Elektroden-Einheit (MEA) in PEM-Brennstoffzellen besteht aus einer komplexen 7-Lagen-Struktur, die unter anderem die Gasdiffusionslage (GDL) und die katalytisch beschichtete Membran (Catalyst Coated Membrane CCM) umfasst. Diese Struktur ist entscheidend für die Effizienz und Langlebigkeit der MEA, insbesondere in Fahrzeuganwendungen. Innerhalb der HyFaB-Aktivitäten übernimmt das Fraunhofer ISE die Herstellung großflächiger MEAs.

Das Projekt »Robo-MEA-Prep«, gefördert vom Umweltministerium Baden-Württemberg, entwickelt in Zusammenarbeit mit dem Forschungszentrum Informatik in Karlsruhe (FZI) eine roboterbasierte, automatisierte Herstellung von MEAs zur Materialqualifizierung. Diese kleinen Test-MEAs mit Flächen bis 30 cm² werden anschließend in einer im Projekt beschafften, parallelisierten Testanlage vermessen. Die Automatisierung verbessert nicht nur die Präzision und Reproduzierbarkeit der MEA-Herstellung deutlich, sondern erlaubt auch eine vierfach höhere Herstellrate pro Zeiteinheit. Dies ist wichtig, da eine Vielzahl an Parametern bei der Herstellung variiert werden kann.

Im Rahmen der HyFaB-Aktivitäten wurde außerdem eine Pilotanlage für die Rolle-zu-Rolle-Fertigung entwickelt (siehe Abbildung unten), um die Prozesse für die industrielle Serienproduktion von MEAs mit 7-Lagen-Struktur zu automatisieren. Diese Anlage, die derzeit ein Anlagenbauer in Baden-Württemberg für das ZSW aufbaut, wird mit rund 3 Millionen Euro vom Bundesverkehrsministerium finanziert und ermöglicht die Untersuchung verschiedener Beschichtungs-, Laminier- und Dichtungskonzepte. Die Anlage wird bis Ende Q2/2025 am ZSW in Betrieb sein. Unter dem Dach des HyFaB-ING-Projekts beschäftigen sich drei Teilprojekte mit diesen Prozessschritten, wobei die Technologien und Materialien fast ausschließlich von mittelständischen Projektpartnern bereitgestellt werden.

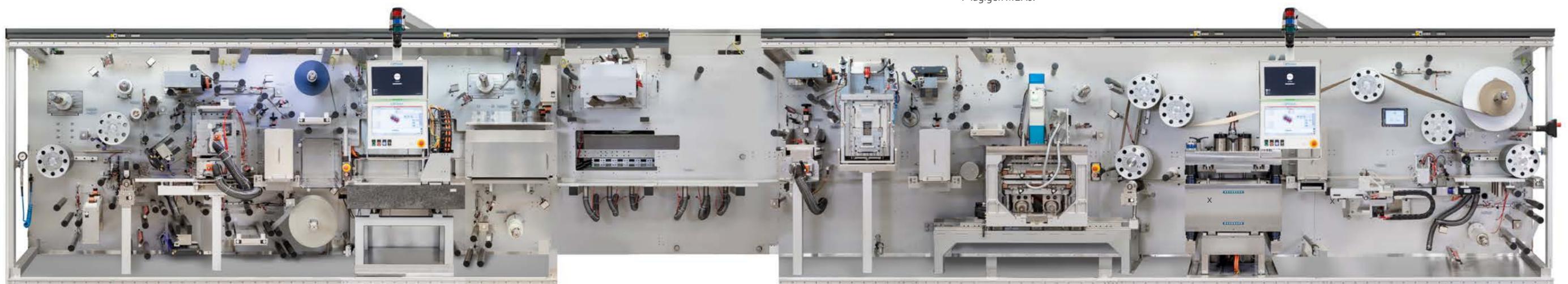


^ Schneidetisch zur Herstellung von MEAs.

^ Cutting table for production of MEAs.

v Rolle-zu-Rolle-Anlage zur automatisierten Herstellung von 7-lagigen MEAs.

v Roll-to-roll system for automated production of 7-layer MEAs.



PRODUCTION OF MEAS WITH A 7-LAYER STRUCTURE

The membrane electrode assembly (MEA) in PEM fuel cells consists of a complex 7-layer structure that includes the gas diffusion layer (GDL) and the catalyst-coated membrane (CCM). This structure is crucial for the efficiency and longevity of the MEA, especially in vehicle applications. MEAs with large surface areas will be manufactured by the Fraunhofer ISE in the HyFaB. The »Robo-MEA-Prep« project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, is now collaborating with the Research Center for Information Technology (FZI) in Karlsruhe on the development of a robot-based, automated MEA production line for material qualification. These small test MEAs with surface areas of up to 30 cm² will then be measured in a parallel test system acquired in the context of the project. Not only will this automation significantly improve the precision and reproducibility of MEA production, it will also increase the overall rate of MEA production fourfold. This is important because a large number of parameters can be varied during the production process.

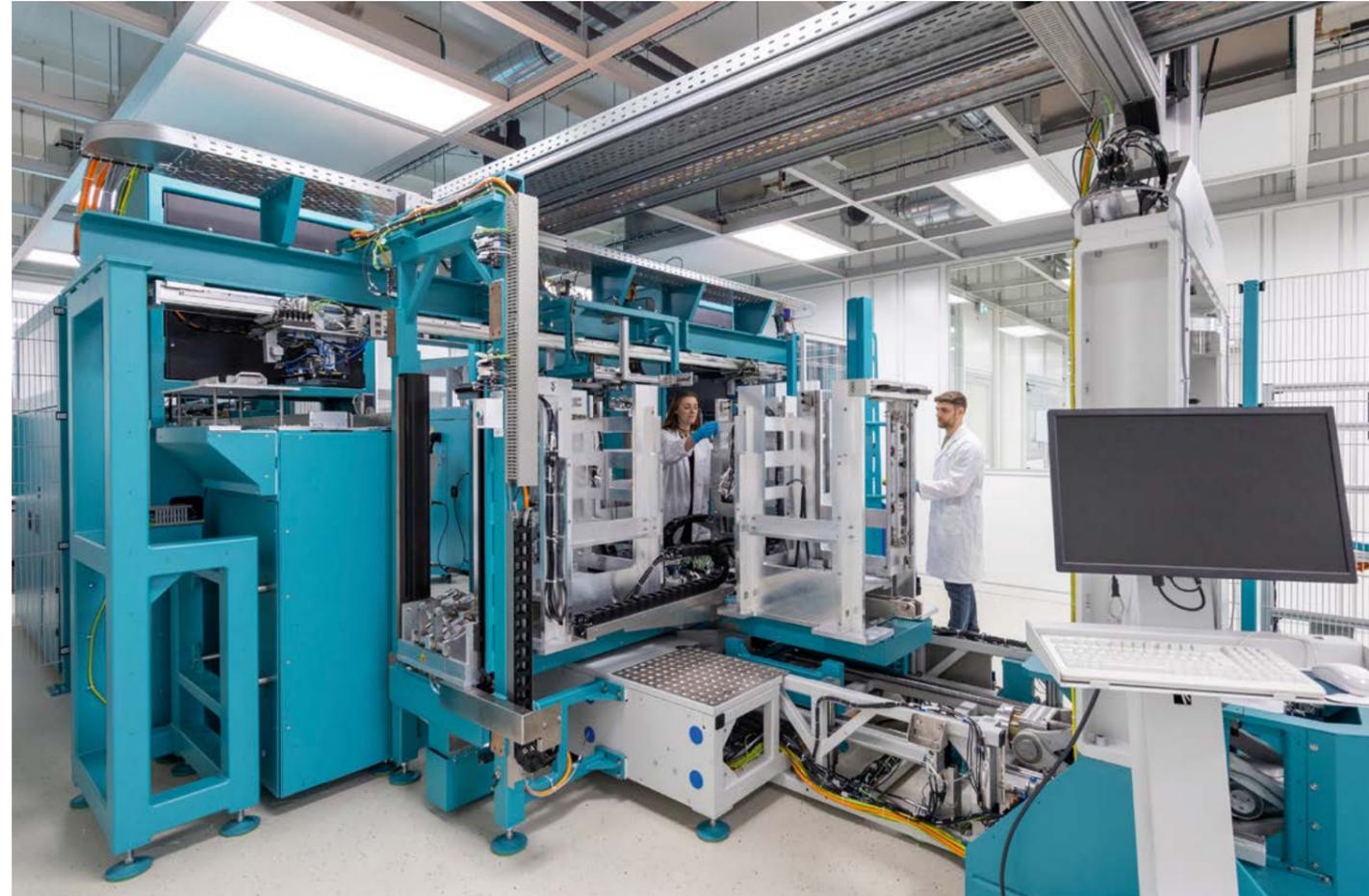
A pilot plant for roll-to-roll production was also developed as part of the HyFaB brief in order to automate the processes for the industrial series production of MEAs with a 7-layer structure (see figure below). At present, this pilot plant is under construction for the ZSW by an engineering company in Baden-Württemberg. The Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV) has provided roughly three million euro in funding for this plant, which will facilitate the testing of various coating, laminating and sealing concepts. The plant will be in operation at the ZSW by the end of Q2/2025. These steps will form the subject of three sub-projects under the umbrella of the HyFaB-ING project, with the technologies and materials being provided almost exclusively by small and medium-sized project partners.

ANLAGE ZUR STACKMONTAGE

Für Hochleistungsbrennstoffzellen, wie sie im Schwerlastverkehr mit einer Leistung von mehr als 250 kW benötigt werden, müssen bis zu 600 einzelne Brennstoffzellen präzise zu einem Stack zusammengesetzt werden. Dieser Prozess erfordert höchste Genauigkeit bei der Ausrichtung und Positionierung jeder Zelle, wird aktuell jedoch noch meist manuell durchgeführt, was auch die Kosten erheblich in die Höhe treibt. Für die HyFaB wurde in Kooperation mit einem deutschen Anlagenbauer eine Referenzanlage entwickelt, die eine vollautomatisierte Fertigung von Brennstoffzellenstacks ermöglicht. Diese Anlage, welche durch Mittel des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg finanziert wurde, übernimmt das gesamte Handling aller Komponenten, einschließlich des Vereinzeln und Greifens von Bipolarplatten und MEAs, sowie die Qualitätsprüfung, bei der Maßhaltigkeit und Vollständigkeit der Bauteile überprüft werden. Ein zentraler Aspekt ist die präzise Ausrichtung der Teile mit einer Genauigkeit von weniger als 50 µm. Nach der Positionierung erfolgt die Kompression der Stacks. Diese wird mit verschiedenen Verfahren und Geschwindigkeiten durchgeführt, um eine optimale Leistung der Stacks zu erzielen. Nach der Fertigstellung werden die Stacks gesichert und verschlossen, wobei alle Schritte sorgfältig dokumentiert werden. Die gesamte Anlage ist in einen klimatisierten Reinraum integriert, der eine kontrollierte und modifizierbare Umgebung für den Fertigungsprozess bietet. Zusätzlich ist die Anlage mit einem Prozessleitsystem verbunden, das eine lückenlose Überwachung und Steuerung aller Fertigungsschritte ermöglicht. Die Testung erfolgt im HyFaB-Brennstoffzellentestfeld. Erste Stacks mit MEA-Einheiten des Projektpartners Fraunhofer ISE und weiteren Komponenten des ZSW konnten im Projekt »Referenzstack«, das vom Umweltministerium Baden-Württemberg finanziert wurde, gebaut werden. Diese Stacks zeigen bereits in ersten Versuchen die gewünschte Zielperformance.



Unser Ziel ist es, durch maschinelle Assemblierung und die Untersuchung von bewussten Fehlpositionierungen wertvolle Erkenntnisse zu gewinnen, um die Taktzeit zu reduzieren sowie Produktionskosten und Energieverbräuche zu optimieren.



^ Für HyFaB entwickelte Anlage zur vollautomatisierten Stapelung von Brennstoffzellenstacks.

^ Fully automated fuel cell stacking system developed for HyFaB.

Our goal is to gain valuable insights through machine assembly and investigation of deliberate misalignments in order to reduce cycle times and to optimise production costs and energy consumption.



> Ein Brennstoffzellenstack für LKW mit einer Leistung von 250 Kilowatt besteht aus 600 Einzelzellen.

> A 250 kW fuel cell stack for a heavy goods vehicle consists of 600 individual cells.



STACK ASSEMBLY LINE

Up to 600 individual fuel cells must be precisely assembled into a stack for high-performance fuel cells, such as those required in heavy goods transport with an output of more than 250 kW. This process calls for supreme precision in the alignment and positioning of each cell. At present, however, this task is still performed manually, which significantly increases costs. A pilot plant has been developed for HyFaB in cooperation with a German engineering company, enabling fully automated production of fuel cell stacks. This plant, which was financed with funds from the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, performs all component handling processes, including separating and gripping bipolar plates and MEAs, along with quality inspection, which involves checking that the dimensions are accurate and that the components are all present and correctly dimensioned. One key aspect is the precise alignment of the parts with a tolerance of less than 50 µm. Once correctly positioned, the stacks are compressed. This is performed using different methods and at different speeds to optimise stack performance. The completed stacks are secured and sealed, with all steps carefully documented. The entire plant is integrated in an air-conditioned cleanroom which provides a controlled and modifiable environment for the manufacturing process. The plant is also connected to a process control system, which enables end-to-end monitoring and control of all manufacturing steps. The testing takes place at the HyFaB fuel cell test site. The »Reference Stack« project, financed by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, produced the first stacks with MEA assemblies made by project partner Fraunhofer ISE and components made by the ZSW. These stacks demonstrate the desired target performance.



Das neue Brennstoffzellentestfeld verfügt über 40 Teststände für Leistungstests bis 250 Kilowatt.

The new fuel cell test field comprises 40 test stations for performance tests up to 250 kW.

LEBENSDAUER, ROBUSTHEIT UND ECHTZEITDATEN

Seit 2001 betreibt das ZSW in Ulm ein Prüffeld für Brennstoffzellenstacks, -systeme und -komponenten. Der Fokus liegt dabei auf der Langzeiterprobung und Analyse der Auswirkung von Verunreinigungen auf Alterung, Lebensdauer und Robustheit der Stacks. Bis Ende 2024 waren über eine Million Betriebsstunden in der Datenbank archiviert.

Im Rahmen der HyFaB wurde das Testfeld auf mehr als 40 vollautomatisierte Prüfstände erweitert, die Leistungstests bis 250 kW ermöglichen. Eine neue Medieninfrastruktur gewährleistet höchste Betriebssicherheit und Reinheit der eingesetzten Medien. Das gesamte Testfeld ist in ein zentrales Datenmanagementsystem integriert, das Messdaten in Echtzeit überwacht und visualisiert. Dies verbessert die Betriebssicherheit, schafft Transparenz und erleichtert Optimierungen.

SERVICE LIFE, ROBUSTNESS AND REAL-TIME DATA

The ZSW in Ulm has operated a test site for fuel cell stacks, systems and components since 2001. The focus is on long-term testing and analysis of the impact of impurities on stack ageing, service life and robustness. More than a million operating hours had been archived in the database by the end of 2024.

The test site was expanded by virtue of HyFaB to accommodate more than 40 fully automated test rigs, which enable performance tests up to 250 kW. A new media infrastructure guarantees maximum operational reliability and the purity of the media used. The entire test site is integrated into a central data management system that monitors and displays measured data in real time. This improves operational reliability, creates transparency and aids optimisation.



Die nahezu vollständige Auslastung der Teststände verdeutlicht den dringenden Bedarf seitens der Industrie für die Weiterentwicklung von Brennstoffzellenstacks.

The test rigs are used almost to capacity, illustrating the urgent demand from industry for further refinement of fuel cell stacks.

PFAS-Nachweis im HyLaB mit neuer Analytik.

PFAS detection in HyLaB using novel analytical techniques.



HYLAB: DAS LABOR FÜR WASSERSTOFFQUALITÄT

Die HyFaB ist keine Stand-Alone Aktivität am ZSW, sondern Teil einer vielfältigen Landschaft an Wasserstoffaktivitäten. So setzt das ZSW seit Jahren Maßstäbe in der Qualitätssicherung von Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Um Brennstoffzellen und das dazugehörige Wasserstofftanksystem in Fahrzeugen vor Verunreinigungen im Wasserstoff zu schützen, muss der an Tankstellen abgegebene Wasserstoff den internationalen Qualitätsnormen ISO 14687 und SAE J2719 sowie der in Deutschland gesetzlich vorgeschriebenen DIN EN 17124 entsprechen. Diese Standards nachzuweisen, ist sehr aufwändig und erfordert einen entsprechenden Gerätepark.

Mit »HyLaB« verfügt das ZSW über eines der weltweit führenden unabhängigen Labore, das Analysen gemäß den anspruchsvollen Kraftstoffnormen durchführen kann. Zu den Aufgaben gehören innovative Analysemethoden, die Untersuchung der Auswirkungen von Verunreinigungen im Wasserstoff auf Brennstoffzellen sowie die Entwicklung von Strategien zur Vermeidung von Schadstoffen. Zusätzlich unterstützt das ZSW Betreiber von Wasserstofftankstellen bei Abnahmen und Qualitätstests.

PFAS-Nachweis in Mikromengen

2024 wurde die vollständige Analyse von Brennstoffzellenproduktwasser ergänzt. Im Rahmen des durch das Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekts »SMART Conditioning« wurden hochauflösende Analytikverfahren wie Hochleistungsflüssigchromatographie (HPLC) und induktiv gekoppelte Plasmaspektrometrie (ICP) jeweils mit Massenspektrometrie-Kopplung gekauft und in Betrieb genommen. Hiermit können perfluorierte Kohlenwasserstoffe, sogenannte PFAS, in Mikromengen nachgewiesen werden. Denn ein mögliches PFAS-Verbot, das innerhalb der Europäischen Union offiziell beantragt wurde, wird sich vermutlich nur abwenden lassen, wenn wissenschaftlich und analytisch klar nachgewiesen werden kann, dass derartige Stoffe von Brennstoffzellen nicht oder nur in unkritischen Mengen ausgeschieden werden.



HYLAB: THE HYDROGEN QUALITY LABORATORY

HyFaB is not a stand-alone project at the ZSW: it is part of a diverse landscape of hydrogen projects. The ZSW has been setting standards for years in the quality control of hydrogen at every link in the value chain in order to make its use in fuel cells reliable and efficient.

In order to protect fuel cells and the associated hydrogen tank system in vehicles from impurities, the hydrogen dispensed at filling stations must comply with ISO 14687 and SAE J2719 international quality standards and with the legal requirements in Germany set out in DIN EN 17124. Proving compliance with these standards is a very complex process requiring an appropriate pool of equipment.

HyLaB sets ZSW apart from other facilities: the hydrogen quality laboratory is one of the world's leading independent laboratories, with equipment to conduct analyses in accordance with exacting fuel standards. The laboratory has a wide brief that includes developing innovative analysis methods, investigating the effects of impurities in hydrogen on fuel cells, and formulating strategies to avoid pollutants. The ZSW also assists operators of hydrogen filling stations with inspection and approval processes and quality tests.

PFAS detection in micro quantities

A system for complete analysis of fuel cell product water was added in 2024. Various high-resolution analytical methods, such as HPLC and ICP, coupled in each case with MS, were purchased and put into operation as part of the »SMART Conditioning« project funded by the Federal Ministry of Economic Affairs (BMWK). As a result, the laboratory is now also able to detect even minute quantities of perfluorinated hydrocarbons (PFAS). A formal proposal has been put forward for a PFAS ban within the European Union. In all probability, the only way to avert such a ban is to conclusively demonstrate by scientific and analytics means that fuel cells do not emit such substances, or only do so to a negligible extent.

WASSERSTOFFERZEUGUNG – ELEKTROLYSEURE AUS BADEN-WÜRTTEMBERG

Keine Brennstoffzelle ohne Wasserstoff! Somit kommt der Erzeugung von grünem Wasserstoff eine große Bedeutung zu. Die Elektrolyseforschung am ZSW ist deshalb auch ein zentraler Baustein in Baden-Württembergs Wasserstoffstrategie. Grüner Wasserstoff, erzeugt durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom, ist essenziell für die Energiewende und für klimaneutrale Brennstoffzellen. Der aktuelle Wasserstoffbedarf in Baden-Württemberg wird von 2,9 TWh/a (2023) bis 2025 auf voraussichtlich 4,1 TWh/a ansteigen. Langfristig wird bis 2040 ein Bedarf von bis zu 90,7 TWh/a bzw. knapp 3 Millionen Tonnen erwartet. Diese Entwicklungen spiegeln sich auch auf europäischer und globaler Ebene wider, wo bis 2030 mit einem Bedarf von 20 Millionen Tonnen in der EU und 125 Millionen Tonnen weltweit gerechnet wird. Die Grundlage für die Prognosen bilden umfassende Analysen, unter anderem von den IHKs in Baden-Württemberg, wissenschaftlich begleitet durch das ZSW.

Während am ZSW in Ulm im Labormaßstab an PEM-Elektrolyseuren gearbeitet wird, fokussieren sich die Arbeiten am ZSW in Stuttgart auf die alkalische Elektrolyse (AEL), wo bislang zwei eigene CE-zertifizierte Komplettsysteme im 1-MW-Maßstab errichtet wurden. Neben der angewandten Forschung vom Material über den Stack bis zum System unterstützt das ZSW die Industrie bei der Umsetzung von Elektrolysetechnologien in Produkte für den nationalen und internationalen Markt, einschließlich der Beratung und dem Technologie-Monitoring. Im Projekt »Elektrolyse made in Baden-Württemberg«, gefördert vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, wurde eines der oben genannten Systeme mit Komponenten von 40 Firmen aus der Region aufgebaut. Aus dem Projekt sind mehrere Industriekooperationen erwachsen, um die eingesetzten Technologien zur Marktreife zu führen.

Mit dem Elektrolysetestfeld »ElyLab« bietet das ZSW bereits heute das größte Test- und Innovationsangebot für Elektrolyseure in Süddeutschland. Dort werden zehn Prüfstände im Leistungsbereich bis 500 kW und mit Stromstärken bis 20.000 Ampere betrieben, um Elektrolysestacks und deren Komponenten zu testen. Die Testkapazitäten sollen in den kommenden Jahren erweitert werden, wobei das Testangebot künftig auch die AEM-Elektrolyse (Anionen-Exchange-Membran) umfassen soll. Dies wird durch das Programm »Strategic Technologies for Europe Platform (STEP)« des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg gefördert.



< Mehrfachprüfstand für beschleunigte Alterungstests von Elektroden.

< Multiple test rig for accelerated ageing tests on electrodes.

^ Elektrolyseur »Made in Baden-Württemberg«.

^ Electrolyser »made in Baden-Württemberg«.



Von der Materialforschung bis zum 1-MW-System – das ZSW entwickelt verschiedene Elektrolysetechnologien und bringt sie zusammen mit der Industrie in den Markt.

HYDROGEN PRODUCTION – ELECTROLYSERS FROM BADEN-WÜRTTEMBERG

Without hydrogen, there can be no fuel cells – which makes green hydrogen production absolutely vital. This is also why electrolysis research at the ZSW is a central component of the hydrogen strategy in Baden-Württemberg. Green hydrogen, produced by electrolysis with renewable electricity, is essential for the energy transition and climate-neutral fuel cells. Annual hydrogen demand in Baden-Württemberg is expected to rise from 2.9 TWh (2023) to 4.1 TWh by 2025. In the long term, demand is expected to be up to 90.7 TWh per year – equivalent to almost 3 million tonnes – by 2040. These developments are also reflected at European and global level, where demand is expected to reach 20 million tonnes in the EU and 125 million tonnes worldwide by 2030. The forecasts are based on extensive analyses conducted by such bodies as the Baden-Württemberg Chamber of Industry and Commerce with scientific support from the ZSW.

While the ZSW in Ulm is working on PEM electrolyzers on a laboratory scale, work at the ZSW site in Stuttgart is focused on alkaline electrolysis (AEL), where two CE-certified, fully integrated 1 MW systems have been built to date. In addition to applied research ranging from the material and the stack right through to the system, the ZSW assists industry in introducing electrolysis technologies in products for the national and international market, including consultancy and technology monitoring. In the »Electrolysis made in Baden-Württemberg« project, one of the aforementioned systems was built with components from 40 companies in the region. The project has resulted in several industrial collaborations aimed at bringing the technologies through to market launch.

Having developed the »ElyLab« electrolysis test site, the ZSW already offers the largest range of testing and innovation services for electrolyzers in southern Germany. There are 10 test rigs in operation at the site with a power range of up to 500 kW and current ratings of up to 20,000 amperes for the testing of electrolysis stacks and their components. There are plans to expand testing capacity in the years ahead, including for anion exchange membrane (AEM) electrolysis. This is made possible through the »Strategic Technologies for Europe« programme operated by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, with a funding over a three-year term.

From materials research to 1 MW systems – the ZSW develops various electrolysis technologies and brings them to market together with the industry.



HyFaB: Forschung & Seminare unter einem Dach – links Seminarraum, rechts Entwicklung automatisierter Stack-Montage.

HyFaB: Research & seminars under one roof. Seminar spaces are to the left, with development activities for automated stack assembly on the right.

MARKTTRENDS UND HERAUSFORDERUNGEN

Die HyFaB startet in einer Phase, in der Brennstoffzellen den Massenmarkt erreichen. Fortschritte wie reduzierter Materialeinsatz (z. B. von Platin in den verwendeten Katalysatoren) und der Übergang zur Serienfertigung bieten ein großes Potenzial für eine massive Kostensenkung. Die HyFaB unterstützt mit Technologien und untersucht grundlegende Fragen: etwa optimale Fertigungsbedingungen, Fehlertoleranzen oder die schnelle Inbetriebnahme von Stacks, die aktuell unter einer Stunde liegt – deutlich schneller als die zwei bis fünf Tage bei Lithium-Ionen-Batterien heute.

Brennstoffzellen für schwere Lkw sind einsatzbereit und können im Flottenbetrieb getestet werden. Parallel sind der weitere Aufbau von Wasserstofftankstellen und Pilotprojekte für Blockheizkraftwerke wichtige nächste Schritte.

Das Recycling von Brennstoffzellenstacks ist heute bereits nahezu vollständig möglich, da metallische Komponenten und Edelmetalle sehr gut zurückgewonnen werden können. Die absoluten Materialmengen sind zudem deutlich kleiner als bei Lithium-Ionen-Batterien und die Materialtrennung bei Brennstoffzellen lässt sich durch mechanisches »Entstapeln« viel leichter durchführen als mittels komplexer Schredder- und Trennprozesse bei Batterien.

MARKET TRENDS AND CHALLENGES

HyFaB is entering a phase in which fuel cells are reaching the mass market. Advances like reduced material input (e.g. use of platinum in the catalysts) and the transition to series production offer great potential for huge cost reductions. HyFaB provides support with these technologies, looking for answers to fundamental questions, from the optimal manufacturing conditions and error tolerances to rapid stack assembly and start-up. At present, this takes less than an hour – significantly faster than the two to five days needed for lithium-ion batteries.

Fuel cells for heavy goods vehicles are ready for deployment and can be tested in fleet services. The construction of hydrogen filling stations and pilot projects for combined heat and power plants are important next steps in parallel with this.

It is now possible to recycle fuel cell stacks almost in full, as metallic components and precious metals lend themselves to existing reclamation techniques. The absolute material quantities are also significantly smaller than with lithium-ion batteries, and the material separation in fuel cells can be carried out much more easily by mechanical »unstacking« than by complex shredding and separation processes for batteries.



Der H2FLY-Brennstoffzellen-Demonstrator.

Emission-free flying: The H2FLY fuel cell demonstrator.

AUSBLICK

Grüner Wasserstoff wird der dominierende molekulare Energieträger der Zukunft sein. Seine universelle Einsetzbarkeit reicht bis in den Bereich emissionsfreier Mobilität: Pkw, Lkw, Busse, Bahnen, Schiffe und Flugzeuge. Die HyFaB befasst sich mit einem entscheidenden Energiewandler: der Brennstoffzelle. Die HyFaB-Plattform unterstützt die Entwicklung von Brennstoffzellen auf dem Weg von der Manufaktur hin zur industriellen Produktion. Ähnlich wie bei Lithium-Ionen-Batterien, bei denen massive Kostensenkungen primär durch die Fertigung und nicht durch den Einsatz neuer Materialien oder Komponenten erreicht wurden, sollen die Kosten durch die automatisierte und hochskalierte Brennstoffzellenfertigung signifikant gesenkt werden.

Parallel dazu müssen Feldtests mit Fahrzeugen beginnen, die ihren Wasserstoff aus Elektrolyseuren »Made in Germany« beziehen – eine realistische Option für eine CO₂-freie und grüne Wertschöpfungskette in Deutschland.

LOOKING AHEAD

Green hydrogen will be the dominant molecular energy vector of the future. It is suitable for universal application, even extending to zero-emission mobility in cars, trucks, buses, trains, ships and aircraft. HyFaB is working on a key energy converter: the fuel cell. The HyFaB development platform is guiding fuel cells from the factory workshop to industrial production. Huge cost reductions were achieved with lithium-ion batteries through the manufacturing process rather than through new materials or components, and there are plans to make significant cuts in the cost of fuel cell production in a similar way through automation and scaling up.

There is now a need to make a start on parallel field tests with vehicles that source their hydrogen from electrolyzers »Made in Germany«. This represents a realistic option for a CO₂-free and green value-added chain in Germany.



Unterstützung mit Technologie – Optimierung von Komponenten für Brennstoffzellenstacks.

Technology support – Optimising components for fuel cell stacks.

FACHGEBIETE &
FORSCHUNGSPROJEKTE

DEPARTMENTS & RESEARCH PROJECTS



Systemanalyse (SYS)

Systems Analysis (SYS)

Unsere Kernkompetenzen

Den Übergang zu einem klimaneutralen Energie- und Wirtschaftssystem aktiv so zu gestalten, dass Wohlstand und Prosperität erhalten werden, ist zentrale Aufgabe des Fachgebiets SYS.

Das Team »Windenergie« setzt dabei direkt auf der Technologieebene an: Im Fokus steht die Entwicklung und Erprobung technischer Lösungen für eine effiziente Nutzung der Ressource Windenergie auch in bergigem Gelände, z. B. durch neue, weniger verschleißanfällige Materialien. Gleichzeitig geht es um eine Steigerung der Akzeptanz von Windkraftanlagen, u. a. durch die Reduktion von Lärmemissionen, flankiert durch die naturschutzfachliche Begleitforschung, mit deren Hilfe der Konflikt zwischen Windenergienutzung und Artenschutz gelöst werden soll.

Daten sind der Ausgangspunkt für das Team »Simulation und Optimierung«. Mit Verfahren des maschinellen Lernens können Energie- und Ressourcenbedarfe gezielt reduziert, Prozesse optimiert oder vollständig neue Produkte, wie ein Antikollisionsystem für windenergiegefährdete Vogelarten, entwickelt werden. Diese Kompetenz ergänzt das Technologie-Know-how anderer Fachgebiete des ZSW hervorragend und ermöglicht eine Erweiterung des Dienstleistungsspektrums des ZSW. An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft bewertet die strategische Systemanalyse Marktchancen parallel zur Technologieentwicklung, analysiert internationale Wettbewerbspositionen und Wertschöpfungspotenziale. Mit der Entwicklung von Markteinführungsinstrumenten für grünen Wasserstoff, grünen Kohlenstoff oder synthetische Kraftstoffe unterstützt das Fachgebiet an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik.

Our core areas of expertise

The main brief of the SYS department is to play an active role in shaping the transition to a climate-neutral economy and energy system without sacrificing wealth and prosperity.

The »Wind Energy« team is directly concerned with the technology, focusing on the development and testing of technical solutions with a view to increasing the efficiency of wind energy use, even in mountainous terrain, e.g. through new materials less susceptible to wear and tear. At the same time, they examine ways to increase acceptance of wind turbines, such as by reducing noise emissions, accompanied by research into nature conservation, intending thereby to resolve the conflict between the use of wind energy and wildlife protection.

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 expertise dovetails perfectly with the technological expertise in other departments at the ZSW and is enabling an expansion in the range of services at the ZSW.

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 department has an active support role at the interface between science and politics.



»Grüner Wasserstoff hat das Potenzial zum »Game Changer« – er eröffnet die Möglichkeit, Industriegesellschaften werterhaltend in die Klimaneutralität zu führen und bietet gleichzeitig nachhaltige Wertschöpfungspotenziale und Zukunftsperspektiven für Entwicklungsländer.«

»Green hydrogen has the potential to be a game changer – it opens up the possibility of guiding industrialised societies to climate neutrality in a way that retains value and, at the same time, offers potential for sustainable added value and future prospects for developing countries.«



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

Das Windenergie-Forschungstestfeld WINSENT – International gefragter Datenlieferant

Auf dem WINSENT-Testfeld werden mit modernster Technik Tag und Nacht verschiedenste Messdaten aufgezeichnet. Windmessmasten und LiDAR-Systeme erfassen meteorologische Parameter wie Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur und Luftdruck. Gleichzeitig werden elektrische und mechanische Größen an den für die Forschung konzipierten und mit Sensoren instrumentierten Forschungswindenergieanlagen (FWEA) gemessen. Ein Großteil der erhobenen Daten steht der Wissenschaft und Öffentlichkeit frei zur Verfügung. Das ZSW und seine Partner des Windenergie-Forschungsclusters WindForS unterstützen damit das im 8. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung verankerte Ziel, die Nutzung der Daten durch Prinzipien der Offenen Wissenschaft (»Open Science«) zu steigern.

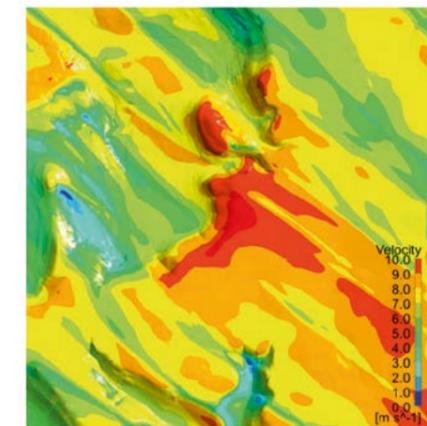
Die auf dem WINSENT-Testfeld generierten Daten stoßen schon heute national und international auf großes Interesse. Aufgrund des Standorts im bergig-komplexen Gelände, den damit verbundenen besonderen Strömungsmechanismen und seiner einzigartigen Ausstattung ist das ZSW-Testfeld u. a. in EU-Forschungsprojekten und auch als Benchmark im Wind Task 57 »Joint Assessment of Models« (JAM) der Internationalen Energieagentur (IEA) eingebunden. Teilnehmende aus Forschung und Industrie gleichen dabei die Ergebnisse ihrer Strömungs- und Anlagensimulationen mit den real am Standort erhobenen Messdaten ab und können auf diese Weise ihre Computermodelle verbessern und weiterentwickeln.



WINSENT wind energy research test site – An internationally sought-after data source

A wide variety of data is collected day and night using state-of-the-art technology at the WINSENT test site. Wind measurement masts and LiDAR systems record meteorological parameters like wind speed, wind direction, temperature and air pressure. At the same time, sensors fitted on the purpose-built research wind turbines measure electrical and mechanical parameters. A large proportion of the data collected is freely available to research scientists and the general public. This way, the ZSW and its partners in the WindForS research cluster demonstrate their support for the aim stated in the 8th Energy Research Programme (Energieforschungsprogramm) adopted by the Federal Ministry for Economic Affairs (BMWK), aiming to increase use of data by adhering to the principles of open science.

The data generated at the WINSENT test site has already attracted considerable interest, both nationally and internationally. Due to its location in complex mountainous terrain, the specific flow mechanisms associated with its location and its unrivalled equipment, the ZSW test site is involved in various undertakings. These include EU research projects and serving as a benchmark in Wind Task 57 »Joint Assessment of Models« (JAM) published by the International Energy Agency (IEA). Key players from research and industry compare the results of their system and flow simulations with the actual measurement data collected at the site, which allows them to improve and develop their computer models.



Ergebnisse einer Simulation der Windströmung im bergigen Gelände mit Geschwindigkeitsvektoren (links) und Geschwindigkeitskonturen in 30 m über Grund (rechts).

Results of a wind flow simulation in mountainous terrain with velocity vectors (left) and velocity contours 30 m above ground (right).

Andreas Rettenmeier
andreas.retteneier@zsw-bw.de
+49 711 7870-229

Entwicklung einer lösungsmittelfreien Li-Ion-Zellproduktion auf Basis von KI

Im Projekt KontElPro, gefördert vom Bundesbildungsministerium, war das Ziel, in Kooperation mit den Fraunhofer-Instituten für Chemische Technologie (ICT), für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) und für Werkstoff und Strahltechnik (IWS) mithilfe von Künstlicher Intelligenz die lösungsmittelfreie Elektrodenherstellung zu optimieren.

Hierzu wurde zunächst eine robuste Dateninfrastruktur entwickelt, die Prozessdaten nicht nur effizient erfasst, sondern mit Hilfe systematischer Prüfverfahren auch die Datenqualität sichert. Im nächsten Schritt gelang es, durch den Einsatz von Deep Neural Networks (DNN) sehr präzise Vorhersagen zur Sensitivität und Signifikanz der jeweiligen Prozesseingangsgrößen zu treffen. Mit Convolutional Neural Networks (CNN) wurden gleichzeitig REM-Bilddaten (z. B. der Morphologie von Elektrodenmaterialien nach dem Knetprozess) analysiert, so dass diese nach entsprechendem Training die Bewertung der Materialqualität übernehmen konnten.

Virtuelle Sensoren und digitale Zwillinge ermöglichten eine Echtzeit-Anpassung von Prozessparametern, so dass erstmals eine kontinuierliche Prozessüberwachung bei gleichzeitig verbesserter Qualitätssicherung realisiert werden konnte.

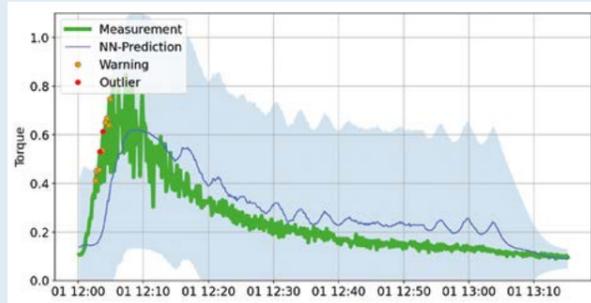
Alle implementierten KI-Lösungen zusammen garantieren die Herstellung qualitativ hochwertiger Elektroden und Zellen mit hoher 4C-Kapazität bei gleichzeitig guter Beschichtbarkeit und Schichtqualität trotz des lösungsmittelfreien Ansatzes – ein Meilenstein für die nachhaltige Batteriefertigung.

Development of a solvent-free Li-ion cell production process based on AI

The KontElPro project, conducted in cooperation with the Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT, the Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials IFAM, and the Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, aimed to optimise solvent-free electrode production with the help of artificial intelligence.

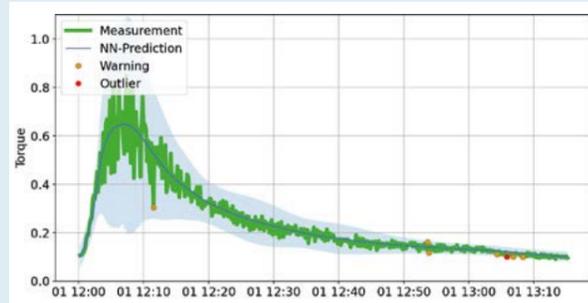
The first step was to develop a robust data infrastructure capable not only of recording process data efficiently but also of ensuring data quality by means of systematic testing procedures. This made it possible to perform highly precise predictions regarding the sensitivity and significance of the respective process input variables by using deep neural networks (DNNs). At the same time, researchers deployed convolutional neural networks (CNNs) to analyse SEM image data (e.g. electrode material morphology following the kneading process), which could then perform assessment of material quality once adequately trained. Virtual sensors and digital twins enabled real-time adjustment of process parameters, making it possible for the first time to introduce continuous process monitoring accompanied by improved quality control.

All the AI solutions together guarantee the production of high-quality electrodes and cells that have high 4C capacity, still lend themselves well to coating and maintain a good layer quality despite the solvent-free approach – a milestone on the road to sustainable battery production.



Modellierung des Knetvorgangs mit den Originaldaten: Der Zeitpunkt, wann die Masse ihre Viskosität ändert (Indikator ist das Drehmoment des Kneters), konnte vom Modell nicht genau abgeschätzt werden.

Modelling of the kneading process with the original data, with the model unable to pinpoint the exact time at which the mass changes its viscosity.



Modellierung des Knetvorgangs mit zusätzlichem Zeitwert: Das KI-Modell kann den Drehmomentverlauf zeitlich präzise abbilden.

Modelling of the kneading process with additional time value, with the AI model able to plot the torque curve over time with precision.

Dr. Frank Sehnke
frank.sehnke@zsw-bw.de
+49 711 7870-303

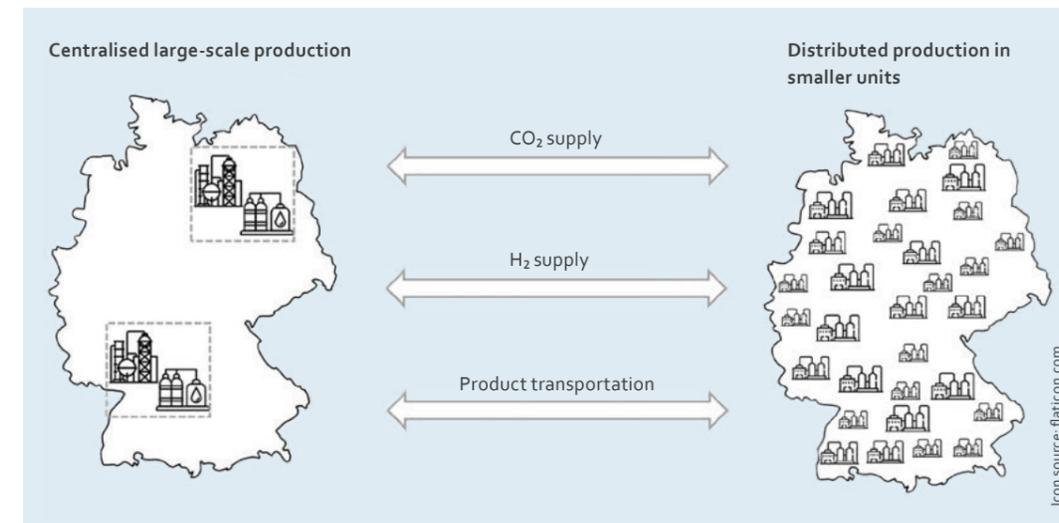
InnoFuels: Innovationsplattform für synthetische Kraftstoffe

Ohne synthetische Kraftstoffe auf der Basis von grünem Strom, Wasserstoff und CO₂ (sog. Renewable Fuels of Non-Biological Origin) sind die Klimaschutzziele nicht zu erreichen – weder auf Bundes- noch auf europäischer Ebene. Der Einsatzfokus liegt auf dem Luftverkehr und der Seeschifffahrt – für beide Bereiche hat die EU entsprechende Kraftstoffquoten eingeführt, um den Markthochlauf bis 2030 zu sichern. Die durch das Bundesverkehrsministerium geförderte Plattform InnoFuels soll durch die Vernetzung von Aktivitäten und Akteuren die Technologieentwicklung für die Produktion und den Einsatz strombasierter Kraftstoffe in Deutschland ebenso beschleunigen wie deren Markteinführung über das Setzen wichtiger Impulse für die Ausgestaltung der Rahmenbedingungen.

Das Fachgebiet SYS leitet im Rahmen des Projekts den Innovationsschwerpunkt Supply Chain und kann hier umfassendes Know-how entlang der gesamten Wertschöpfungskette bereitstellen. Die bisherige Analyse umfasste insbesondere die Ausgangsmittel grüner Strom und Wasser für die Elektrolyse, aber auch CO₂ für die Syntheseverfahren. In Zusammenarbeit mit InfraserV Höchst wurden Optionen der Strombeschaffung für große Syntheseanlagen eruiert und Leitfäden erstellt, um Einstiegshürden für potenzielle Betreiber zu senken. Für CO₂ als Rohstoff erfolgte eine Szenarienanalyse mit Blick auf die zukünftige Entwicklung von CO₂-Märkten. Als weiterer Partner bringt die e-mobil BW aktuelle Entwicklungen auf Landesebene ein.

InnoFuels: Innovation platform for synthetic fuels

Climate targets cannot be met – in Germany or at the European level – without synthetic fuels based on green electricity, hydrogen and CO₂ (known as »renewable fuels of non-biological origin« – or »RFNBO« for short). The operational focus is on air travel and shipping – for which the EU has introduced fuel quotas to ramp up the market by 2030. The InnoFuels platform is funded by the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV). It aims to accelerate the technological development for the production and use of electricity-based fuels in Germany by linking initiatives and key players while expediting their market launch by injecting key impetus into efforts to create framework conditions. The project has a number of innovation focal points: the SYS department is leading the way on the supply chain, where it can provide extensive expertise throughout the value-added chain. The analysis to date has most notably encompassed green electricity and water as source media for electrolysis as well as CO₂ for the synthesis processes. Possible ways of procuring electricity for large synthesis plants have been explored in collaboration with InfraserV Höchst, with guidelines drawn up to lower the threshold to entry for potential operators. A scenario analysis has been carried out for CO₂ as a raw material with a view to the future development of CO₂ markets. Another partner is e-mobil BW, an agency for innovation in mobility, which provides vital input on current developments at state level.



Schematischer Ansatz zur Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Produktionskonzepte auf die Supply Chain.

A schematic approach to analysing the effects of different production concepts on the supply chain.

Dr. Tobias Buchmann
tobias.buchmann@zsw-bw.de
+49 711 7870-329

Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

Unsere Kernkompetenzen

Um den Ausbau der Photovoltaik (PV) zu beschleunigen, arbeitet das ZSW an Materialien und Fertigungsverfahren für die nächste Generation der PV. Der Fokus liegt dabei auf Lichtabsorbieren aus metallorganischen Perowskiten und Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (kurz CIGS). Diese Dünnschichttechnologien zeichnen sich durch einen geringen Material- und Energieeinsatz sowie kostengünstige Herstellverfahren aus. Weitere Vorteile sind ein geringer ökologischer Fußabdruck und die Möglichkeit, leichte und flexible Folien als Trägermaterial zu verwenden. Mit Tandemsolarzellen, die zwei Absorber mit unterschiedlicher optischer Bandlücke kombinieren, lassen sich zudem Wirkungsgrade oberhalb des praktischen Wirkungsgradlimits konventioneller PV-Technologien erreichen.

Forschungsarbeiten zu neuen Materialien, Solarzellen und Herstellungsprozessen werden im Labor durchgeführt, bevor sie im Technikum auf größere Modulflächen übertragen werden. Dort können Module bis zu einer Größe von 30 x 30 cm² weitgehend mit Durchlaufprozessen und damit sehr industrienahen Verfahren entwickelt und hergestellt werden. Das ermöglicht den schnellen Transfer neuer Forschungen und Prozesse in die industrielle Fertigung. Auf flexiblen Substraten wie Polymer- oder Metallfolien werden im Rolle-zu-Rolle-Verfahren Prozesse für beliebig lange und bis zu 30 cm breite Dünnschichtmodule entwickelt. Diese können im Freifeld, auf dem Hausdach sowie als integrierte Photovoltaik in Fahrzeugen und Gebäudefassaden eingesetzt werden.

Auf Basis seiner großen Erfahrung mit Dünnschichttechnologien löst das Fachgebiet für Kunden vielfältige prozesstechnische und materialanalytische Aufgaben.

Our core areas of expertise

The ZSW is working on materials and manufacturing processes for the next generation of photovoltaics (PV) in a bid to accelerate the expansion of PV. The focus is on light absorbers made of organometallic perovskites and copper indium gallium selenide (CIGS). The advantages of these thin-film technologies include low material input, low energy consumption and inexpensive manufacturing processes. They also boast a small carbon footprint as well as the possibility of using lightweight and flexible films as carrier materials. It is also possible to achieve efficiency levels above the limit of conventional single-junction PV technologies in practice by using multi-junction solar cells, which combine two absorbers with different optical band gaps.

Research work on new materials, solar cells and manufacturing processes is carried out in the laboratory before being transferred to larger module surfaces at the pilot plant – where it is possible to develop and manufacture modules measuring up to 30 x 30 cm², mainly using continuous processes very similar to industrial production lines. This enables the rapid transfer of new research findings and production processes to industry.

Working on flexible substrates, such as polymer foil and metal foil, the department develops roll-to-roll processes for thin-film modules up to 30 cm wide and of various length. These can be used outdoors, on rooftops and as integrated photovoltaics in vehicles and on buildings.

Drawing on its extensive experience with thin-film technologies, the department carries out a wide range of process engineering and material analysis jobs for customers.



Dr. Stefan Paetel
Head of Department
stefan.paetel@zsw-bw.de
+49 711 7870-237

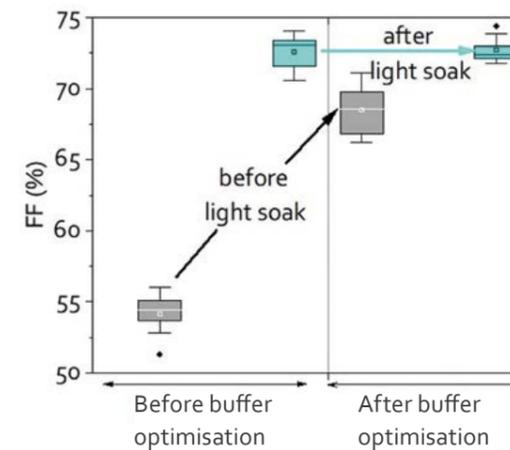


»Photovoltaik ist aktiver Klimaschutz. Darum unterstützen wir unsere Partner bei der kostengünstigen Herstellung flexibler, leichter und hocheffizienter Dünnschicht-solarmodule.«

»Photovoltaics technology is climate protection in action. This is why we help our partners to manufacture flexible, lightweight and highly efficient thin-film solar modules at low cost.«

Aus weniger Licht mehr machen

Tandemsolarzellen bieten die Möglichkeit, das Sonnenspektrum effizienter zu nutzen. Dabei werden zwei Solarzellen mit unterschiedlichen, abgestimmten Absorptionsbereichen als Schichtstapel übereinander angeordnet. Das ZSW entwickelt verschiedene Kombinationen aus den Dünnschichttechnologien Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), Perowskit, CdTe und auch Silizium (Si). CIGS ist aufgrund seiner einstellbaren Bandlücke ein guter Kandidat für die Anwendung als untere Zelle im Tandem (Bottomzelle, siehe Abbildung rechts). Typischerweise wird das Wirkungsgradpotenzial von Tandemzellen aus separaten Messungen der Top- und Bottomzellen berechnet. Im Zuge der Entwicklung von CIGS mit niedriger Bandlücke verbesserten die ZSW-Forschenden das Messverfahren, um die echten Bedingungen in einer Tandemzelle widerzuspiegeln. Die Zellen werden dazu im Dunkeln gelagert und nur mit dem entsprechend von der oberen Zelle durchgelassenen Licht beleuchtet. Fehlende kurzzeitige Beleuchtung davor mit weißem Licht kann durch eine Abnahme im Füllfaktor und damit auch im Wirkungsgrad (siehe Abbildung links) Verluste in der Solarzelle hervorrufen. In einer Einzelzelle mit voller Beleuchtung treten diese Verluste nicht auf, im Tandem aber schon. Um diesen Effekt zu verhindern, der durch die geänderte Beleuchtung für die Pufferschichten hervorgerufen wird, mussten diese optimiert werden. Dadurch konnten die Verluste stark reduziert werden, so dass die CIGS-Solarzellen mit einem Füllfaktor von 72-75 % sehr gut für die Anwendung als Bottomzelle geeignet sind.



Alle Messungen mit reduziertem Lichtbereich. Füllfaktor FF von Bottomzellen vor (links) und nach (rechts) Optimierung der Pufferschichten, jeweils vor und nach Beleuchtung mit weißem Licht.

All measurements with reduction in light. Fill factor FF of bottom cells before (left) and after (right) optimisation of the buffer layers, in each case before and after illumination with white light.

Making more out of less light

Tandem solar cells make it possible to use the solar spectrum more efficiently. Two solar cells with different, coordinated absorption ranges are stacked in layers one on top of the other. The ZSW is developing various combinations of the thin-film technologies Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS), perovskite, CdTe and silicon (Si). Due to its adjustable band gap, CIGS is a good candidate for use as the lower cell in the tandem arrangement (bottom cell, see figure, right). The efficiency potential of tandem cells is typically calculated from separate measurements of the top and bottom cells. In the course of developing CIGS with a low band gap, ZSW research scientists improved the measurement method in order to reflect the real conditions in a tandem cell. The cells are stored in the dark and are only illuminated with the light let through by the upper cell. An absence of a short time of illumination with white light beforehand can cause losses in the solar cell due to a decrease in the fill factor and therefore also in efficiency (see figure, left). These losses do not occur in a single cell with full illumination but do occur in the tandem stack. This effect is caused by the change in illumination for the buffer layers with optimisation required to prevent this. This made it possible to greatly reduce the losses, meaning that the CIGS solar cells with a fill factor of 72-75 % are eminently suited for use as bottom cells.

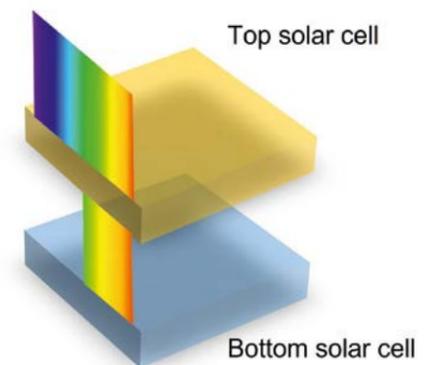
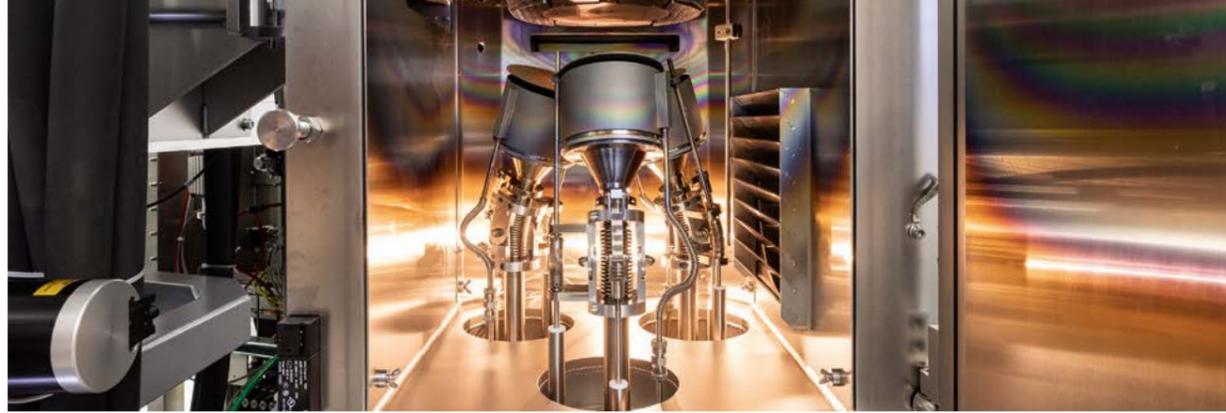


Illustration des reduzierten Lichtbereichs in der unteren Solarzelle im Tandem.

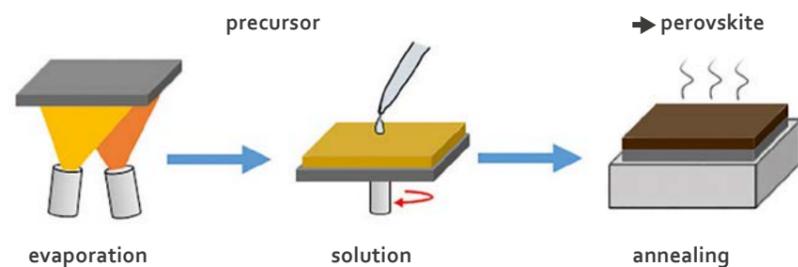
Illustration of the reduction in light in the bottom solar cell in the tandem stack.

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



Vielseitige Perowskite

Die Perowskit-Technologie kann insbesondere auch mit Silizium-Solarzellen im Tandemverbund verwendet werden. Solche Si-Solarzellen sind meistens mit Pyramidenstrukturen im Mikrometerbereich an der Oberfläche zur besseren Lichteinkopplung angeordnet. Diese Oberfläche macht daher eine Modifikation der Perowskit-Beschichtung notwendig, um eine gleichmäßige Bedeckung zu gewährleisten. Dazu wird eine Kombination aus verdampften Ausgangsschichten und aus einer Lösung aufgetragenen organischen Schichten verwendet (siehe Abbildung unten). Perowskit-Schichten werden in Kombination mit CIGS-Solarzellen auch in neuen Projekten für die Entwicklung von Tandemmodulen und -zellen eingesetzt. Neben dem Einsatz für die Photovoltaik, welche die Optimierung der Verschaltung von Tandemzellen erfordert, werden die Bauteile mit gestapelten Solarzellen auch zur Photo-Elektrokatalyse eingesetzt und ermöglichen dort einstellbare hohe Arbeitsspannungen. Das ZSW baut aktuell dank finanzieller Unterstützung durch das Land Baden-Württemberg seine Laborinfrastruktur für die Skalierung der Perowskit-Dünnschichttechnologie mit industriellen Verfahren aus. Im Zuge dessen vertieft das ZSW seine strategische Kooperation mit der Universität Stuttgart (Prof. Michael Saliba) und dem Karlsruher Institut für Technologie (Prof. Ulrich Paetzold) für die Entwicklung der Technologie von der Materialforschung bis hin zur Vor-Pilotierung mit der Industrie.



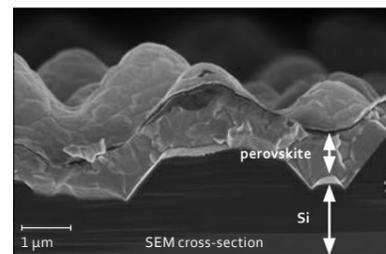
Hybride Perowskit-Herstellung: Gleichmäßige Perowskit-Abscheidung auf texturierten, unebenen Si-Oberflächen durch hybride Technik aus Vakuumverdampfen und Lösungsbeschichtung.

Versatile perovskites

Perovskite technology is also particularly suitable for use in tandem with silicon solar cells. Si solar cells of this kind are usually arranged with pyramid structures in the micrometre range on the surface for better light coupling. This surface necessitates a modification of the perovskite coating to guarantee uniform coverage. This involves a combination of vapour deposition starting layers and organic layers applied from a solution (see figure below).

Perovskite layers are also used in combination with CIGS solar cells in new projects for the development of tandem modules and tandem cells. In addition to being used for photovoltaics, components with stacked solar cells are also used for photoelectrocatalysis, where they enable adjustable high operating voltages.

Thanks to financial support from the state of Baden-Württemberg, the ZSW is currently expanding its laboratory infrastructure for the scaling of perovskite thin-film technology using industrial processes. In the course of this expansion, the ZSW is intensifying its strategic cooperation with the University of Stuttgart (Prof. Michael Saliba) and the Karlsruhe Institute of Technology (Prof. Ulrich Paetzold), which focuses on developing the technology from the materials research stage right through to the steps prior to pilot runs with industry.



Hybrid perovskite fabrication: Uniform perovskite deposition on textured, uneven Si surfaces using hybrid vacuum evaporation and solution coating techniques.

Perowskit-Solarzellen auf den Kopf gestellt

Der Schichtstapel von Perowskit-Solarzellen ist aus überwiegend historischen Gründen in 99 % aller Veröffentlichungen im sog. Superstrataufbau realisiert, bei dem das Licht durch das transparente Trägermaterial (z. B. Glas oder Folie) auf die Zelle fällt.

Solarzellen im umgedrehten sog. Substrataufbau (Trägermaterial unten) bieten jedoch prinzipielle Vorteile: Das Licht muss nicht durch das Trägermaterial und die sich darauf befindende Elektrode hindurch, weshalb dort keine spezielle Anforderung an die Lichtdurchlässigkeit besteht, was eine höhere Freiheit bei der Materialwahl ermöglicht. Die Elektrode kann daher auch aus einer opaken, hoch-leitfähigen Schicht aus Metall bestehen.

Molybdän stellte sich dabei hinsichtlich der Kompatibilität der Solarzellenverschaltung mittels Laserstrukturierung als beste Lösung heraus. Um eine schädliche Reaktion oder Diffusion von Metallionen durch die direkt auf der Metallschicht abgeschiedenen flüssigprozessierten Schichten zu unterbinden, wurden am ZSW verschiedene anorganische und organische Zwischenschichten erfolgreich eingesetzt. Dabei zeigte eine dünne Schicht aus Silazan die beste Wirkung hinsichtlich Stabilität und Effizienz der Solarzellen (siehe Abbildung).

Die Ergebnisse stellen einen wichtigen ersten Schritt zur Realisierung spezieller flexibler Perowskit-Solarzellen mittels Schlitzdüsenabscheidung und Rolle-zu-Rolle-Verfahren dar.

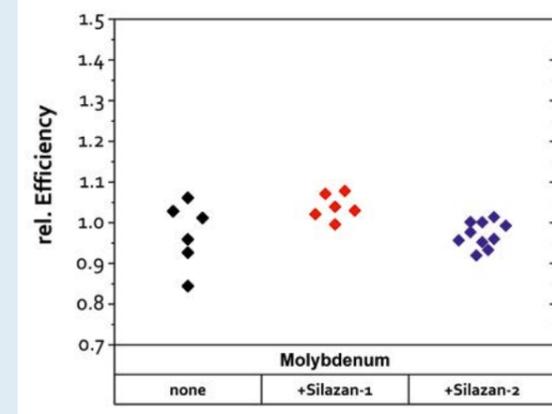
Perovskite solar cells turned upside down

In 99% of all publications, perovskite solar cells are stacked in what is known as a superstrate configuration, with light falling onto the cell through a transparent carrier material (e.g. glass or film). This is primarily for historical reasons.

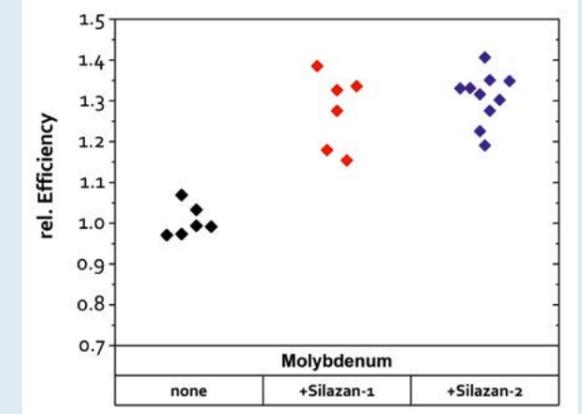
However, solar cells with an inverted, substrate configuration (i.e. with carrier material below) offer fundamental advantages: the light does not have to pass through the carrier material and the electrode positioned on it. This, in turn, means the carrier material is not subject to any specific transparency requirements, which provides greater freedom in the choice of material. The electrode can therefore also consist of an opaque, highly conductive layer of metal.

Molybdenum turned out to be the best solution in terms of compatibility with the solar cell connection using laser structuring. In order to prevent a harmful reaction or diffusion of metal ions through the liquid-processed layers deposited directly on the metal layer, the ZSW deployed a variety of inorganic and organic intermediate layers – with considerable success. A thin layer of silazane exhibited the best effect in terms of the stability and efficiency of the solar cells (see figure).

The results represent an important first step on the way to special flexible perovskite solar cells using slot die coating and roll-to-roll processes.



Wirkungsgrad von Perowskit-Solarzellen im Substrataufbau mit verschiedenen Zwischenschichten, jeweils relativ zum Standard Molybdän. Links: Die initialen Wirkungsgrade sind für alle Varianten gleich. Rechts: Nach beschleunigter Alterung bei 85 °C für 100 h unter Stickstoffatmosphäre ist der Wirkungsgrad der Zwischenschichten mit Silazan besser.



Efficiency of perovskite solar cells in the substrate structure with different intermediate layers, each relative to the standard molybdenum. Left: The initial efficiency levels are the same for all variants. Right: After accelerated ageing at 85 °C for 100 hours in a nitrogen atmosphere, the efficiency of the intermediate layers with silazane is better.

Dr. Erik Ahlswede
erik.ahlswede@zsw-bw.de
+49 711 7870-247

Jonas Hanisch
jonas.hanisch@zsw-bw.de
+49 711 7870-234

Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)

Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung der Qualität und Zuverlässigkeit von Photovoltaik (PV)-Modulen sowie die effiziente Nutzung des Solarstroms sind die Fokusthemen des Fachgebiets. Dies wird einerseits erreicht durch eine umfangreiche Test- und Messinfrastruktur sowie andererseits durch die digitale Modellierung von PV-Anlagen zur optimierten Betriebsführung und Einspeisung des Solarstroms in das Energiesystem.

Mit jahrzehntelanger Erfahrung werden im Testlabor Solab und auf dem Freiland-Testfeld Widderstall PV-Module und -Systeme hinsichtlich Leistung, Energieertrag und Alterungsverhalten untersucht. Die Anpassung der Testinfrastruktur auf neue PV-Modul-Technologien und -Systeme sowie größere Formate ist weitgehend abgeschlossen. Bei der Qualitätsbewertung von PV-Modulen aus Solarparks stehen stichprobenartige Alterungsuntersuchungen sowie Materialanalysen von kritischen Modulkomponenten wie Rückseitenfolien und Verkapselungsmaterialien im Fokus. Die Erkenntnisse fließen bei der Mitarbeit in Normungsgremien ein und kommen so unseren Kunden zugute.

Das ZSW berät bei der Planung, Ertragsberechnung, Optimierung und Qualitätssicherung von PV-Projekten. PV-Systeme tragen wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung bei. Um die lokale Nutzung von Solarstrom zu erleichtern, entwickelt das ZSW Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten sowie das Lademanagement für die Elektromobilität. Das Fachgebiet MSA ist Entwicklungspartner bei der Anwendung entsprechender Algorithmen für den Netzbetrieb und den Energiemarkt und berät gewerbliche Kunden auf dem Weg zur Klimaneutralität ihrer Dienstleistungen und Produkte.

Our core areas of expertise

The department's focus topics are ensuring the quality and reliability of photovoltaic (PV) modules and facilitating the efficient use of solar power. This is achieved, on the one hand, by an extensive testing and measurement infrastructure and, on the other hand, by digital modelling of PV systems for optimised O&M and feed-in of solar power into the energy system. Based on decades of experience, the department analyses the performance, energy yield and ageing behaviour of PV modules and PV systems in the Solab test laboratory and on the Widderstall outdoor test site. Work to adapt the test infrastructure to new PV module technologies and systems and larger formats has been largely completed. When assessing the quality of PV modules from solar farms, the focus is on examining the ageing of selected module samples. This involves material analysis of critical module components, such as backsheets and encapsulation materials. The findings are incorporated into our work in standardisation bodies and benefit our customers.

The ZSW consults on PV projects in the planning phase regarding yield calculation, optimisation and quality management of components. PV systems make a significant contribution to sustainable power supply. The ZSW is developing algorithms for the optimised operation of generators, storage facilities and supplies in order to facilitate the local use of solar power and the management of charging systems for electric vehicles. The MSA department is a development partner in the application of corresponding algorithms for grid operation and the energy market, advising commercial customers on the route to climate neutrality in their services and products.



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

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



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

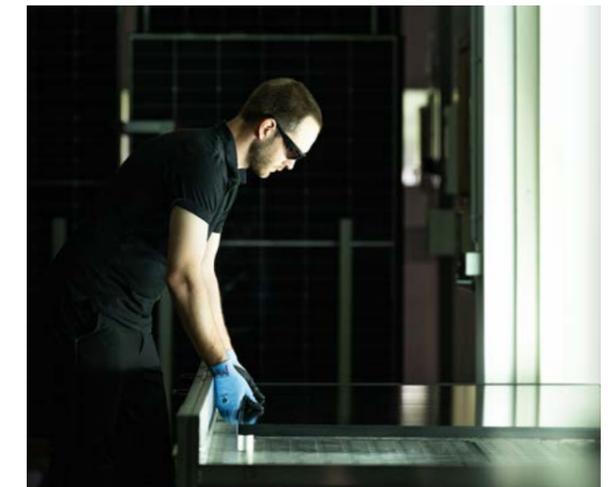
ZSW Solab

Die Mess- und Test-Infrastruktur des ZSW-Testlabors für PV-Module, ZSW Solab, wurde im Jahr 2024 schrittweise an die sich stark diversifizierenden PV-Modultechnologien angepasst. In Verbindung mit der über Jahrzehnte gewachsenen Kompetenz zu standardisierten Qualitätstests und Messungen unterstützt das ZSW Solab Industriekunden bei deren Qualitätsmanagement, insbesondere bei Auswahl und Betrieb von PV-Modulen und PV-Systemen. Im Mittelpunkt stehen aktuell PV-Module, die auf neuesten Zelltechnologien wie Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)-, Heterojunction (HJT)- und Interdigitated Back Contact (IBC)-Solarzellen basieren. Neben den Servicedienstleistungen für Industriekunden liegt ein weiterer Schwerpunkt bei Forschungsarbeiten zu Langzeitstabilität und potenziellem Degradationsverhalten der aktuellen Modultechnologien. Hierbei ist es das Ziel, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Modulkomponenten und deren Einfluss auf die Modulperformance unter Umwelteinflüssen wie beispielsweise UV-Bestrahlung zu verstehen und Degradationsrisiken zu vermeiden. Untersuchungen des elektrischen Isolationsverhaltens stellen ein weiteres Themenfeld dar, in dessen Zusammenhang auch gezielte Materialanalysen an Modulkomponenten wie zum Beispiel Rückseitenfolien oder Verkapselungsfolien durchgeführt werden, die durch Messungen des eigentlichen Isolationsverhaltens über Leckströme ergänzt werden.



ZSW Solab

In 2024, the measurement and testing infrastructure at Solab, the ZSW test laboratory for PV modules, was gradually adapted to rapidly diversifying PV module technologies. Given the expertise in standardised quality tests and measurements acquired over decades, the ZSW Solab provides support for commercial customers in relation to quality management, especially in the selection and operation of PV modules and PV systems. The focus is currently on PV modules based on the latest cell technologies, such as tunnel oxide passivated contact (TOPCon), heterojunction (HJT) and interdigitated back contact (IBC) solar cells. In addition to services for industrial customers, another focus is research into the long-term stability and potential degradation behaviour of current module technologies. The aims are to understand interactions between different module components and their influence on module performance under environmental influences, such as UV radiation, and to avoid degradation risks. Research at Solab also examines electrical insulation behaviour, involving systematic material analyses on module components, such as backsheets or encapsulation films, supplemented by measurements of the actual insulation behaviour via leakage currents.



Ausstattung des ZSW Solab mit state-of-the-art Modul Flasher und Lichttisch für Dauerbestrahlung mit UV und sichtbarem Licht.

Equipping the ZSW Solab with state-of-the-art module flasher and light table for continuous irradiation with UV and visible light.

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



Solar-Testfeld Widderstall

Das ZSW nutzt das Solar-Testfeld Widderstall bei Merklingen (siehe Abbildung oben) seit 1989 für Freifelduntersuchungen von PV-Modulen und PV-Systemen unter realen Einstrahlungs- und Witterungsbedingungen. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für Analysen der Modul- und System-Performance sowie von Degradations- und Alterungsmechanismen der verschiedenen PV-Absorber-Materialien. Die Verknüpfung dieser Felddaten mit Resultaten aus Labormessungen und standardisierten Qualitätstests im ZSW Solab ermöglicht ein schrittweises Angleichen der Labortestverfahren an die im realen Betrieb auftretenden Belastungen.

Als Beispiel sind Resultate aus einem Kundenprojekt angeführt, bei dem verschiedene bifaziale Modultypen (mit p-Typ- oder n-Typ-Zellen) hinsichtlich ihres Ertragsverhaltens in einer Dachaufstellung nach vorgegebenen Spezifikationen mit zwei unterschiedlich reflektierenden Untergründen untersucht wurden (siehe Abbildungen unten). Aus der Jahresbilanz werden neben dem Potenzial des Dachmaterials besonders die Ertragsvorteile von bifazialen n-Typ-Modulen der TOPCon-Technologie gegenüber p-Typ-Modulen deutlich (im Beispiel mehr als 3 %).

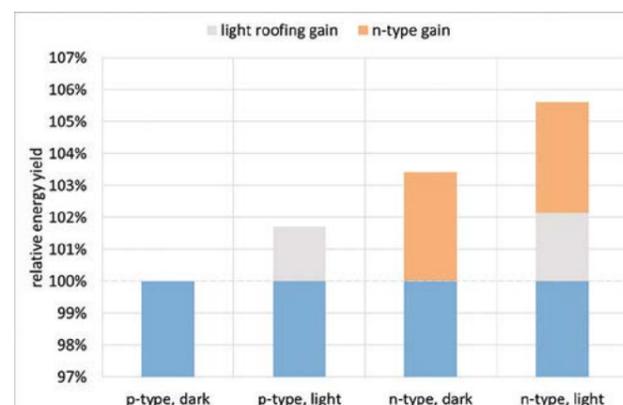


Widderstall solar test site

Since 1989, the ZSW conducted outdoor tests on PV modules and systems under real irradiation and weather conditions at its Widderstall solar test site, near Merklingen pictured above.

The data obtained forms the basis for analyses of module and system performance along with degradation and ageing mechanisms of different PV absorber materials. The correlation of these field data with results from laboratory measurements and standardised quality tests in the ZSW Solab makes it possible to adapt laboratory test procedures, gradually aligning them with the loads experienced in real-world operation.

The sample results below are taken from a customer project in which various bifacial module types (with p-type or n-type cells) were examined with regard to their yield patterns in a roof installation with reference to a set of specifications for two backgrounds with different reflective properties (see figures below). In addition to the potential of the roof material, the annual summary also emphasises the increased yield bifacial n-type modules with TOPCon technology compared with that of p-type modules (in this case, a more than 3% increase).



Vergleichende Untersuchung des Energieertrages über ein Jahr von unterschiedlichen n-Typ- und p-Typ-PV-Modulen auf zwei verschiedenen Untergründen im Rahmen eines Kundenauftrages.

Comparative investigation of the energy yield over one year of different n-type and p-type PV modules on two different substrates as part of a customer order.

Olaf Schanz
olaf.schanz@zsw-bw.de
+49 711 7870-21

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

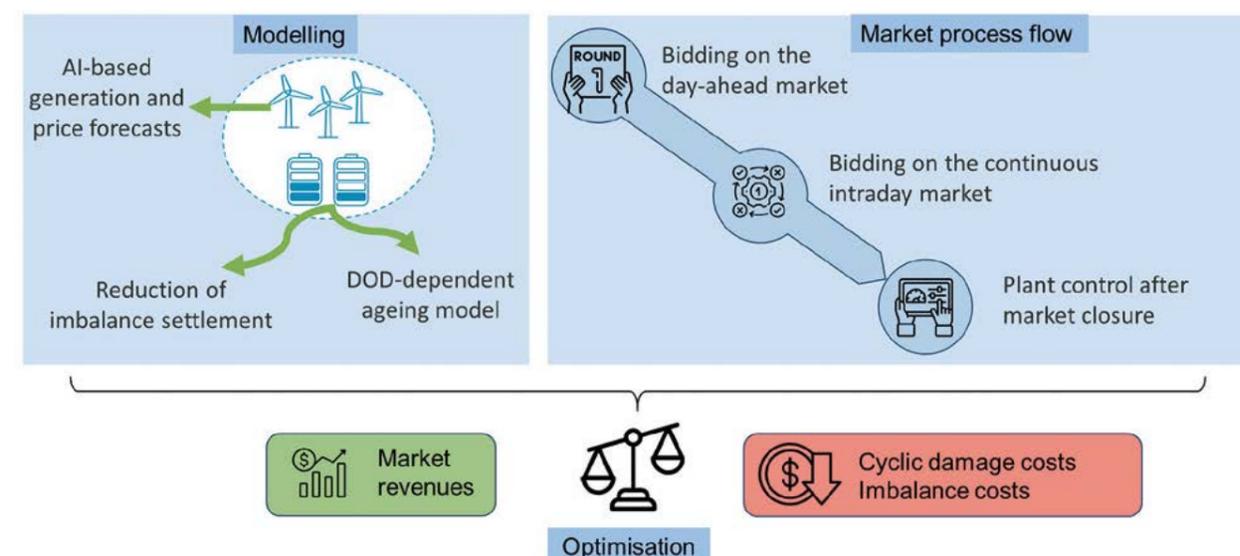
Optimierung von Batteriespeichern in Kombination mit EE-Anlagen

Bei der Vermarktung von Strom aus erneuerbaren Energien (EE) besteht aufgrund der wetterabhängigen Erzeugung die Herausforderung, dass dieser Strom im Vorhinein, z. B. am Day-Ahead-Markt, unter Prognoseunsicherheiten vermarktet werden muss. Auftretende Prognoseabweichungen können für Stromvermarkter zu hohen Kosten führen, da die Abweichungen zwischen geplanter und realer Produktion im Nachhinein bilanziert und über Ausgleichsenergie kompensiert werden. Batteriespeicher vermindern das Risiko von hohen Ausgleichsenergiekosten, indem sie kurzfristigen Prognoseabweichungen entgegenwirken. Neben diesem kurzfristigen Bilanzausgleich ergeben sich für den Batteriespeicher auch Erlösmöglichkeiten beim Arbitragehandel (Nutzung von Preisunterschieden verschiedener Märkte oder Zeitscheiben) auf den Energiemärkten. Kosten werden hier allerdings durch die häufige Zyklierung der Batterie verursacht, welche zu einem Kapazitätsverlust der Batterie führt. Das ZSW entwickelt Optimierungsalgorithmen für die Vermarktung von Batteriespeichern unter der expliziten Berücksichtigung von Batteriealterungskosten. Anhand eines Fallbeispiels, in dem ein Batteriespeicher in Kombination mit einem Windpark vermarktet wird, konnten Mehrerlöse von 5 % gegenüber der Optimierung ohne Berücksichtigung der Batteriealterung demonstriert werden. In zukünftigen Arbeiten sollen u. a. auch die Regelleistungsmärkte in die Optimierung integriert werden.

Optimisation of battery storage systems in combination with renewable energy systems

When it comes to marketing electricity from renewable energy sources, the challenge lies in trading this electricity in advance – i.e. on day-ahead markets. However, such forecasts are subject to uncertainty due to the weather-dependent nature of generation from renewables. Discrepancies can result in high costs for electricity traders because the differences between projected and actual production are settled retrospectively and compensated for by means of balancing energy. Battery storage systems reduce the risk of high balancing energy costs by counteracting short-term forecast differences. In addition to this short-term balancing, there are also revenue opportunities for battery storage systems through arbitrage trading (taking advantage of price differences in different markets or time periods) on the energy markets. Costs are incurred here by the frequent cycling of the battery, however, which leads to a loss of battery capacity.

The ZSW is developing optimisation algorithms for the marketing of battery storage systems, explicitly taking battery ageing costs into account. A case study in which a battery storage system is marketed in combination with a wind farm demonstrated additional revenue of 5% compared to optimisation without taking battery ageing into account. There are also plans to integrate the balancing power markets and other factors in the optimisation process in future research work.



Optimierung von Windpark und Batteriespeicher am Energiemarkt. Die Alterung der Batterie wird in Abhängigkeit von der Entladetiefe (DOD, englisch: Depth of discharge) modelliert.

Optimisation of wind farm and battery storage on the energy market. Battery ageing is dependent on the depth of discharge (DOD).

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 im Kontext von Power-to-X (eFuels). Im Bereich Circular Economy werden Kreislaufprozesse der Phosphor-Rückgewinnung und dem rohstofflichen Recycling 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 Fokus im Bereich Wasserstoff liegt auf serientauglichen und skalierbaren Materialien und Fertigungsmethoden für alkalische Elektrolyseure. Darum verfügt das ZSW über eigene Elektrolysestack- und Systemtechnologien bis in den MW-Maßstab und hat bereits zwei CE-zertifizierte Elektrolysekomplettsysteme mit jeweils 1 MWel Anschlussleistung errichtet und betrieben. Kunden werden vielfältige Testmöglichkeiten von Materialien bis zum Multi-MW-Stack (ElyLab) angeboten. Für die Herstellung von eFuels werden im Fachgebiet Verfahren zur effizienten, regenerativen CO₂-Bereitstellung aus der Luft (Direct Air Capture) oder aus biogenen Reststoffen entwickelt. Die eigene Forschungsanlage mit einer jährlichen Abscheidkapazität von 100 Tonnen CO₂ ist eine der größten DAC-Anlagen Deutschlands. Industriekunden werden vom Komponenten-Engineering bis zur Inbetriebsetzung kommerzieller Kompletanlagen und beim Technologie-Monitoring beraten. Neben den Elektrolyse- und Power-to-X-Aktivitäten entwickelt das Fachgebiet innovative Verfahren zum Recycling von Phosphor und zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen.

Our core areas of expertise

The REG department develops technologies with practical applications for the production of hydrogen and renewable fuels in the power-to-X context (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 on reproducible and scalable materials and manufacturing methods for alkaline electrolyzers. This is why 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_{el}. Customers are offered a wide range of facilities for tests on materials right through to multi-MW stacks (ElyLab). The department develops processes for the efficient renewable supply of CO₂ from the air (direct air capture) or from biogenic residues for the production of e-fuels. The department has its own research facility with an annual separation capacity of 100 tonnes of CO₂, making it one of the largest DAC plants in Germany. Industrial customers can seek advice on aspects ranging from component engineering right through to the commissioning of turnkey commercial systems and systems 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.



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*.«

»Drawing on our *in-house developments* and *testing capabilities*, we are supporting industry in ramping up the market for *electrolysis* and *e-fuels* – two technologies of the future.«

Skalierung von AEL-Druckstacks in den Multi-Megawattmaßstab

In dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekt »MegaStack-BW« entwickelt und validiert das ZSW gemeinsam mit Industriepartnern Konzepte für die Skalierung von Elektrolysestacks in einer Größenordnung von mehreren Megawatt. Ausgangsbasis ist eine bereits bestehende ZSW-Stacktechnologie (Alkalische Druckelektrolyse, 0,5 MW) mit einer aktiven Zellfläche von bislang 3.000 cm², die um den Faktor 3 bis 4 vergrößert werden soll. Für eine zeit- und kosteneffiziente Skalierung werden verschiedene Industrie-4.0-Methoden eingesetzt, wie beispielsweise eine Stacksimulation, FEM-Analysen sowie KI-gestützte Bildauswertungen der Zelldurchströmung. Mit Hilfe dieser Werkzeuge wird eine auch auf andere Stackdesigns übertragbare Skalierungsmethode entwickelt. Auf dieser Grundlage wird der Prototyp eines »MegaStack-BW« mit einer Zellfläche von über 10.000 cm² konstruiert. Dieser wird mit Komponenten aus Baden-Württemberg aufgebaut und in einem Prüfstand für großflächige Elektrolysestacks validiert. Die Industriestruktur in Baden-Württemberg bietet enorme Potenziale für die Entwicklung und Fertigung von Stackkomponenten sowie die erforderlichen Bearbeitungsmaschinen und Werkzeuge. Im projektbegleitenden Industriedialog werden über das Projektkonsortium hinaus weitere Unternehmen aus der Zuliefer- und Werkzeugindustrie angesprochen und aktiviert.

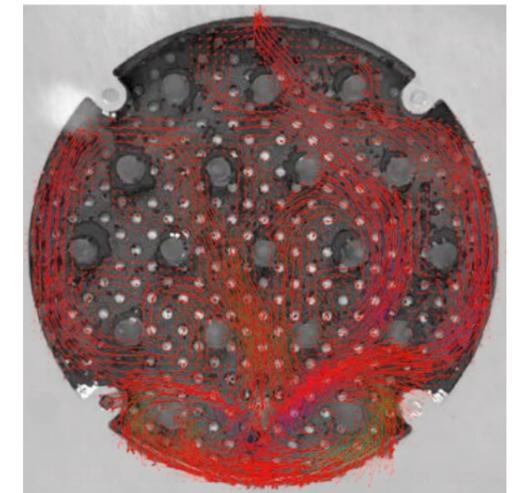
Upscaling of AEL pressure stacks to multi-megawatt scale

In the »MegaStack-BW« project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, the ZSW is collaborating with industry partners to develop and validate concepts to scale up electrolysis stacks to several megawatts. The starting point is an existing ZSW stack system (alkaline high-pressure electrolysis, 0.5 megawatts) with an active cell area of 3,000 cm², which is set to be increased by a factor of 3 to 4. Various Industry 4.0 methods are being used for time-efficient and cost-effective scaling processes, such as stack simulation, FEM analyses and AI-assisted evaluations of the cell flow images. These tools will be helpful in developing a scaling method which can also be transferred to other stack designs. The prototype of a »MegaStack BW« with a cell area of over 10,000 cm² will be constructed on this basis. It will be built with components from Baden-Württemberg and validated in a test rig for large-scale electrolysis stacks. The industrial structure in Baden-Württemberg holds enormous potential for the development and production of stack components and the necessary processing machines and tools. Further component suppliers and enterprises from the tool manufacturing industry will be approached in the industry-wide discussion accompanying the project and mobilised in addition to the project consortium.



Links: Das Team vor dem Prüfstand für die Validierung von Elektrolysestacks.

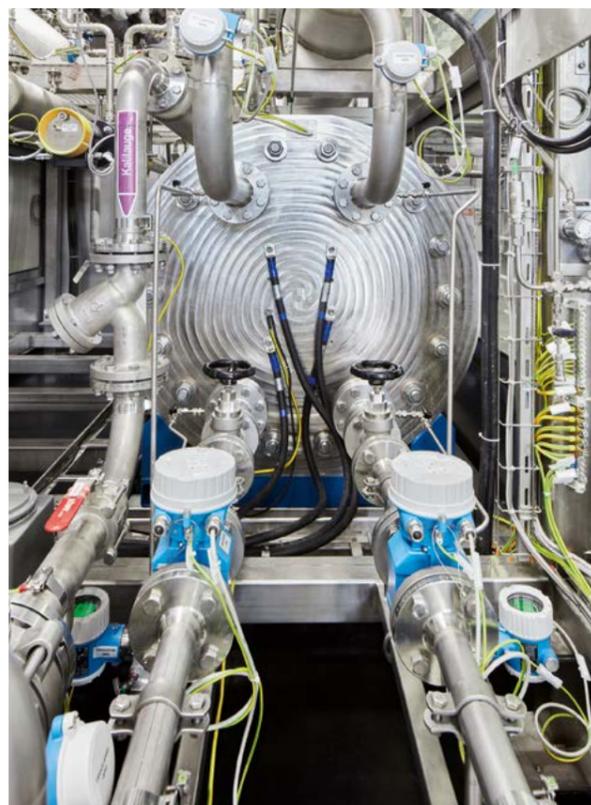
Left: The team in front of the test bench for the validation of electrolysis stacks.



Rechts: Visualisierung der Zelldurchströmung mit KI-unterstützter Bildauswertung.

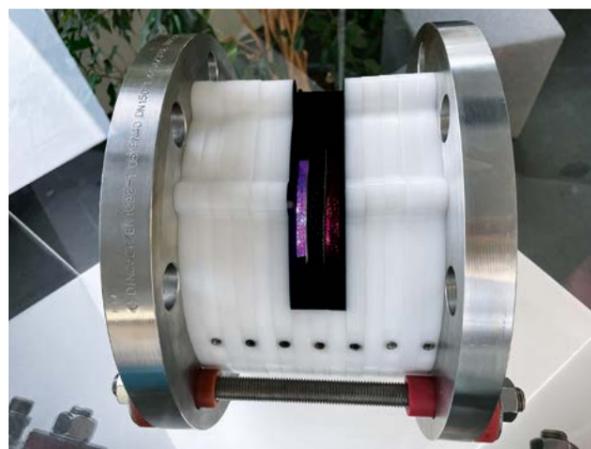
Right: Cell flow visuals with AI-assisted image analysis.

Dipl.-Ing.
Tonja Marquard-Möllenstedt
tonja.marquard-moellenstedt@zsw-bw.de
+49 711 7870-285



Prüfstand für die Erprobung von Elektrolyse-stacks bis 0,5 MW.

Test rig for trials of electrolysis stacks up to 0.5 MW.



Schnittmodell eines Stacks, in dem flexibel Elektrolysekomponenten erprobt werden.

Sectional model of a stack for flexible testing of electrolysis components.

Erweiterung des Elektrolyse-Testfelds »ElyLab« gestartet

Das ZSW hat mit dem Ausbau seines Test- und Innovationszentrums für Elektrolyseure (ElyLab) begonnen. Das Projekt wird durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg im Programm »Strategic Technologies for Europe Platform (STEP)« gefördert.

Die Erweiterung umfasst ca. 400 Quadratmeter an neuer Labor- und Bürofläche sowie neue Elektrolyse-Prüfstände. Dadurch kann zukünftig die gesamte Bandbreite von 1 kW bis 500 kW für Komponenten- und Stacktests lückenlos abgedeckt werden. Zudem wird in ein H₂-Blockheizkraftwerk investiert, um den im Testbetrieb entstehenden Wasserstoff effizient rückzuverstromen und die hausinterne Wärmeerzeugung zu unterstützen. Mit den geplanten Infrastrukturerweiterungen und neuen Prüfständen können die bestehenden Testkapazitäten nahezu verdoppelt werden.

Die Investitionen dienen sowohl der Forschungsarbeit als auch dem Ausbau des Dienstleistungsangebots des ZSW. Im Rahmen des Projekts sollen dazu auch die Test- und Analysemethoden für die Entwicklung von Schnellalterungsmethoden erweitert werden. Neben der Alkalischen Elektrolyse (AEL) werden die Testmöglichkeiten auch auf die so genannte AEM-Elektrolyse (Anionen-Exchange-Membran) ausgeweitet.

Work to expand to »ElyLab« electrolysis test site now underway

The ZSW has started work on the expansion of its testing and innovation centre for electrolyzers (ElyLab). The project is funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs as part of its »Strategic Technologies for Europe Platform« (STEP). This work will create an additional 400 square metres of new laboratory and office space as well as new electrolysis test rigs. This will enable full coverage of the entire range from 1 kW to 500 kW in component tests and stack tests in future. Some capital is also being invested in an H₂ combined heat and power plant in order to promote efficiency in converting the hydrogen generated during test runs back into electricity, thus promoting in-house heat generation. The planned infrastructure expansion and new test rigs are set to almost double the testing capacity. The investments will benefit both the research work and the extension of the range of services offered by the ZSW. There are also plans to extend the test and analysis techniques for the development of accelerated ageing methods during the project. In addition to alkaline electrolysis (AEL), the test facilities will also be expanded to include anion exchange membrane (AEM) electrolysis.

Thomas Ottitsch
thomas.ottitsch@zsw-bw.de
+49 711 7870-362



Containerintegrierte skalierbare DAC-Anlage mit einer jährlichen Abscheidkapazität von 100 Tonnen CO₂.

Containerised scalable DAC plant with an annual separation capacity of 100 tonnes of CO₂.

CO₂-Gewinnung aus der Luft

Im Rahmen des vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts »Direct Air Capture made in Baden-Württemberg (DAC-BW)« wurde im Oktober 2024 eine der größten Direct Air Capture (DAC)-Anlagen Deutschlands am ZSW in Betrieb genommen. Das vom ZSW entwickelte Verfahren entzieht der Umgebungsluft CO₂, welches nach der Aufbereitung als Rohstoff für die Chemieindustrie, zur Herstellung von eFuels oder zur Sequestrierung genutzt werden kann.

In den letzten beiden Jahren hat das Fachgebiet REG intensiv an der Industrialisierung dieser Technologie gearbeitet, um regionalen Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau neue Geschäftsfelder zu eröffnen. In einem Industriedialog mit aktuell 40 Firmen wurden technologische Lösungen und künftige Märkte für CO₂ diskutiert. Prognosen zufolge müssen DAC-Technologien bis 2050 weltweit 1 bis 2 Milliarden Tonnen CO₂ jährlich aus der Atmosphäre entfernen – mit entsprechend großen Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenzialen.

Die neue, vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderte Anlage hat eine Abscheidkapazität von 100 Tonnen CO₂ pro Jahr und zeigt auf, wie DAC-Technologien skaliert und kosteneffizient gestaltet werden können. Mit seinen eigenen DAC-Entwicklungen sowie Beratungs- und Testmöglichkeiten unterstützt das Fachgebiet Unternehmen beim Markteinstieg und Markthochlauf von DAC-Technologien.



CO₂ extraction from the air

One of the largest direct air capture (DAC) plants in Germany was put into operation at the ZSW in October 2024 with funding from the Baden-Württemberg Ministry of Transport's »Direct Air Capture made in Baden-Württemberg« project (DAC-BW). The process developed by the ZSW extracts CO₂ from the ambient air; this is processed and can then be used as a raw material for the chemical industry, for e-fuel production or sent for sequestration.

The REG department has worked intensively on the industrial roll-out of this technology in the last two years with a view to opening up new business prospects for mechanical and plant engineering firms in the surrounding region. Technological solutions and future markets for CO₂ were on the agenda in an industry-wide discussion involving 40 companies. Forecasts suggest that DAC technologies will be required to remove 1 to 2 billion tonnes of CO₂ from the atmosphere worldwide every year by 2050 – mirroring similarly great potential for added value and job creation.

Funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, the new plant has a separation capacity of 100 tonnes of CO₂ per year and demonstrates the ability to design DAC technologies in a scalable and cost-efficient manner. With its own DAC developments, expert advice and test facilities, the REG department supports enterprises looking to enter the market and ramp up DAC technologies.

Blick in den Container der DAC-Desorber-einheit.

View into the container of the DAC desorber unit.

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

Akkumulatoren Materialforschung (ECM)

Accumulators Materials Research (ECM)

Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECM entwickelt Materialien und Prozesse für die nächste Generation von Lithium-Ionen-Batterien sowie für Post-Lithium-Konzepte wie Natrium-Ionen-Batterien und Magnesium- bzw. Kalzium-Systeme.

Ziel ist eine höhere Zellperformance und Zukunftsfähigkeit durch höhere Nachhaltigkeit in allen Schritten vom Material bis zur Batteriezelle. Ein wichtiger Aspekt ist die Substitution kritischer Rohstoffe wie Kobalt und Nickel. So wurde u. a. das Themenfeld Natrium-Ionen in 2024 stark ausgebaut. Alle Schritte vom Material zur Zelle werden hier mittlerweile erforscht. Erste Zellöffnungen kommerzieller Natrium-Ionen-Zellen erlauben wichtige Einblicke in Konzepte und Designs.

Mit der Fertigstellung und Inbetriebnahme einer industrienahe Forschungsproduktionsanlage zur Herstellung maßgeschneiderter Kathodenmaterialien wurde die Skalierungslücke zwischen Labor- und industrieller Materialsynthese geschlossen. Das modular angelegte Synthesetechnikum ermöglicht die flexible Anpassung an neue Prozesse und Zellchemien sowie die Materialbereitstellung bis zu 100 kg.

In der Elektrodenentwicklung wird u. a. an der Vermeidung giftiger Lösungsmittel und PFAS-basierter Binder sowie an lösemittelfreien Prozessen gearbeitet. Für Hochleistungszellgeometrien wurde am Fachgebiet ECM eine Anlage zum automatisierten Laserschneiden neuer Ableiterstrukturen sowie eine automatisierte Wickereinheit in Betrieb genommen. Das Team erforscht auch Alterungsmechanismen an verschiedensten Zellen, um auf Basis des generierten Wissens Maßnahmen zur Lebensdauererhöhung abzuleiten. Als stark wachsender Bereich etabliert sich das Themenfeld Direktrecycling der Speichermaterialien.

Our core areas of expertise

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

The aim is to enhance cell performance while increasing sustainability at every stage from the material to the battery cell. One important aspect is the substitution of critical raw materials like cobalt and nickel. In this context, the area of sodium-ion technology was significantly expanded in 2024. Every step from the starting materials through to the finished cell is now under examination. The first openings of commercial sodium-ion cells provide important insights into concepts and designs.

A research pilot plant for the production of cathode materials tailored to industry needs has now been completed and put into operation, closing the gap between laboratory and industry scale in material synthesis. The modular design of the synthesis pilot plant provides the requisite flexibility to adapt to new processes and cell chemistries and supply materials in quantities of up to 100 kg.

Two aspects of the work underway in electrode development are the avoidance of toxic solvents and PFAS-based binders and the development of solvent-free processes. An automated laser-cutting machine for new conductor structures and an automated winding unit have been commissioned at the department ECM to facilitate high-performance cell geometries.

Ageing mechanisms are being investigated on a wide variety of cells in an effort to learn more about improving service life and derive corresponding countermeasures. There are solid signs of rapid growth in relation to the direct recycling of storage materials.



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



»Der Transfer von Forschungsergebnissen in Produkte muss deutlich schneller erfolgen. Dies geht nur durch eine enge Kooperation zwischen Forschung und Industrie.«

»The transfer of research results into products needs to be much faster. This requires close cooperation between research and industry.«



Der Bau von Powder-Up! wurde ermöglicht durch die Förderung des Bundesforschungsministeriums mit 24 Mio. € (Geräte) und des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg (Gebäude) mit 10 Mio. €.

The construction of Powder-Up! was made possible by €24 million of funding (for equipment) from the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) along with €10 million (for buildings) from the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, Labour and Tourism.

Powder-Up! – Bereit zur Skalierung

In nur 18 Monaten Bauzeit wurde am ZSW das innovative Synthesetechnikum »Powder-Up!« errichtet. Nun ist es betriebsbereit. Dieses hochmoderne Synthesezentrum ermöglicht zielgerichtetes Materialdesign und die Skalierung von Synthesen bis in den 100-kg-Maßstab. Powder-Up! schließt somit die bisherige Lücke zwischen Laborentwicklung und industrieller Materialsynthese.

Ausgestattet mit modernster industrierelevanter Technik verfügt das Powder-Up-Technikum über die durchgängige Synthesekette vom Ausgangsstoff zum hochperformanten Kathodenmaterial. Dies ermöglicht es, nahtlos von der ersten Idee bis zur großtechnischen Produktion zu arbeiten und neue Konzepte schnell umzusetzen. Durch die breite maschinelle Ausstattung und den modularen Aufbau ist eine flexible Anpassung auch an neue Syntheserouten möglich.

Die erweiterte Hochdurchsatzanalytik spielt eine wichtige Rolle in der Entwicklung, da sie zeitnah Ergebnisse auch bei hohem Probenaufkommen liefert. Dies ist entscheidend für eine beschleunigte Prozessentwicklung und -optimierung. So wird nicht nur die Forschung vorangetrieben, sondern auch der Transfer neuer Speichermaterialien in die industrielle Anwendung beschleunigt.

Mit der Digitalisierung aller Prozesse wird eine präzise Steuerung und Kontrolle aller Prozessschritte, die vollständige Datenerfassung und Rückverfolgbarkeit angestrebt, um perspektivisch mittels KI die Prozesse effizient zu optimieren.

Powder-Up! – Ready to scale up

It has taken just 18 months to build the innovative »Powder-Up!« synthesis pilot plant at the ZSW. It is now ready for operation. The state-of-the-art synthesis centre will enable targeted material design and the expansion of synthesis processes up to the 100 kg scale. Powder-Up! will therefore close the gap between laboratory development and industrial-scale material synthesis.

Equipped with the very latest industrial technology, the pilot plant will cover all the links in the synthesis chain, from the source material right through to the high-performance cathode material. This will make it possible to move seamlessly from the initial idea to large-scale production and act swiftly to implement new concepts. The wide range of machinery and modular structure also provide built-in flexibility for adaptation to new synthesis routes.

High-throughput analysis tools will play an important role in development by delivering results promptly, even with high sample volumes. This is crucial for accelerated process development and process optimisation. Not only will this drive forward research, it will also accelerate the transfer of new storage materials into commercial use.

Digitalisation of all processes aims to achieve precise control and monitoring of all process steps along with complete data recording and traceability, thereby opening the door to AI-assisted efficiency optimisations in the future.

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

Post-Mortem-Analyse kommerzieller Natrium-Ionen-Zellen

Am ZSW wurden im Verbund mit dem Helmholtz-Institut Ulm (HIU) erste kommerzielle zylindrische Natrium-Ionen-Batterie-zellen (NIB) im 18650- und 26700- Format geöffnet, untersucht und mit der bestehenden Lithium-Ionen-Technologie verglichen. Aus den Potentialverläufen und chemischen bzw. physikalischen Analysen wurden Hard Carbon als Anoden- und $\text{Na}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_z\text{Mn}_{1-y-z}\text{O}_2$ (NFM) als Kathodenmaterial identifiziert. Die Natrium-Ionen-Zellen zeigen starke Ähnlichkeiten zu Lithium-Ionen-Batterien sowohl im gewählten Zelldesign und Aufheizverhalten als auch in ihrem Innenwiderstand. Die spezifische Energie der Zellen liegt mit $\sim 120 \text{ Wh kg}^{-1}$ in einem ähnlichen Bereich wie die als Referenzsystem mitunter-suchten Lithiumeisenphosphat-basierten, für Hochleistungs-anwendungen optimierten Lithium-Ionen-Zellen (siehe Abbil-dungen unten). Die Ähnlichkeit des Zelldesigns zwischen Natrium- und Lithium-Ionen-Zellen deutet auf vergleichbare Fertigungsschritte hin, was die tatsächliche Einsetzbarkeit als Drop-In Technologie zeigt. Die hier untersuchten NIB-Zellen bieten in der Tat wettbewerbsfähige Leistungskennzahlen. Auffällig ist jedoch die schnelle Degradation, die zeigt, dass hier weiteres Optimierungspotential besteht. Diese Ergebnisse können als Ausgangspunkt für eine umfassende Bewertung der Leistungskennzahlen von NIB-Zellen dienen. Im Fachgebiet wird das Thema durch die Untersuchung und Bewertung größerer kommerzieller Zellformate weiter ausgebaut werden.

Post-mortem analysis of commercial sodium-ion cells

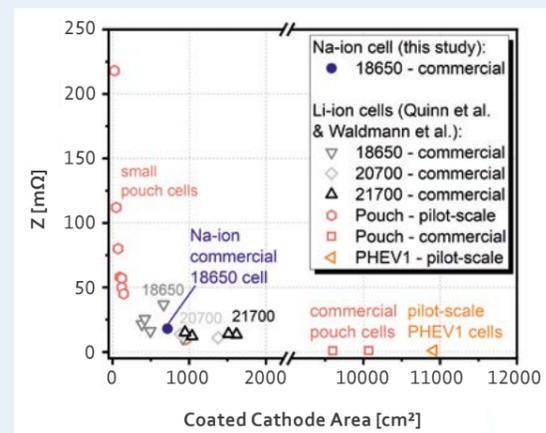
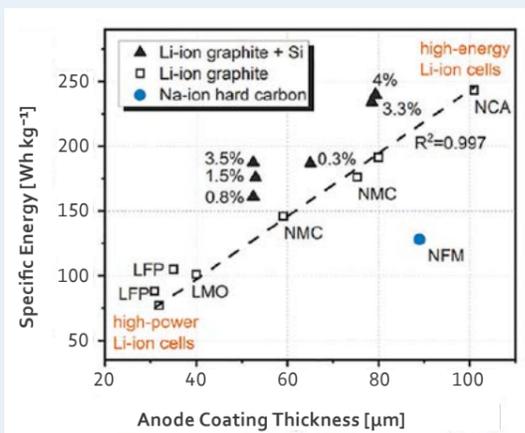
The ZSW joined forces with the Helmholtz Institute Ulm (HIU) in research to open, examine and compare the first commercial cylindrical sodium-ion battery cells (SIB) in 18650 and 26700 formats with existing lithium-ion technology. Having observed the potential curves and conducted chemical and physical analyses, hard carbon was identified as the anode material and $\text{Na}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_z\text{Mn}_{1-y-z}\text{O}_2$ (NFM) as the cathode material. The sodium-ion cells show strong similarities to lithium-ion batteries in terms of the selected cell design, heating properties and internal resistance. The specific energy of the cells is $\sim 120 \text{ Wh kg}^{-1}$ and is therefore in a similar range to the (lithium iron phosphate-based) lithium-ion cells optimised for high-performance applications, which were also examined as a reference system (see figures below). The similarity in cell design in sodium-ion and lithium-ion cells is indicative of comparable manufacturing steps, attesting to its potential for use as a drop-in technology. The SIB cells examined in this case offer competitive performance indicators. One striking point, however, is the rapid degradation, indicating further scope for optimisation. These results can serve as a starting point for a full evaluation of the performance indicators of SIBs. The department will examine this issue in more depth by examining and evaluating larger commercial cell formats.

Herstellungsprozess für Siliziumoxid-haltige Lithium-Ionen-Batterieelektroden

Bei der Umsetzung der Energiewende spielen Lithium-Ionen-Batterien eine wichtige Rolle. Hohe Energiedichte ist ein Schlüsselfaktor in vielen Bereichen. Idealerweise sollen sie aus breit verfügbaren Ausgangsstoffen und mit umweltschonenden Prozessen hergestellt werden. Die Verwendung von präli-thiertem kohlenstoffbeschichtetem Siliziumoxid (Li-SiO-C) anstelle von Graphit als Aktivmaterial in der Anode kann hier einen sehr großen Fortschritt ermöglichen. Bisher lässt sich Graphit nur zu einem geringen Prozentanteil durch Li-SiO-C ersetzen. Die wissenschaftliche Literatur zu diesem Material basiert auf Laborversuchen. Zudem beeinträchtigen die chemischen Eigenschaften von Li-SiO-C in ungewöhnlich starkem Maß seine Verarbeitbarkeit mit herkömmlichen Produktionsprozessen. Am ZSW wurde nun ein industrietauglicher Prozess zur wasser-basierten Herstellung von Anoden mit einem kommerziell hochrelevanten Elektrodendesign und einem sehr hohen Anteil von 20 % Li-SiO-X in der Anodenaktivmasse erforscht. Dabei wurde der Einfluss von Bindern, Prozess- und Leitfähigkeits-additiven auf wichtige Verarbeitungseigenschaften im gesamten Elektrodenherstellungsprozess systematisch untersucht. Den Wissenschaftlern ist es gelungen, mit industrietauglichen Anlagen 120 Meter doppelseitig beschichtete Elektroden mit sehr guter mechanischer Qualität herzustellen und eine beachtliche Zyklenstabilität in Vollzellen nachzuweisen (siehe Abbildung unten).

Manufacturing process for silicon oxide-based lithium-ion battery electrodes

Lithium-ion batteries have been assigned an important role in realising the energy transition, as high energy density is a key factor in many areas. They should ideally be made from widely available raw materials and manufactured using eco-friendly processes. The use of prelithiated carbon-coated silicon oxide (Li-SiO-C) instead of graphite as the active material in the anode can enable great steps forward in this field. It has only been possible until now to replace a small percentage of graphite with Li-SiO-C, and the scientific literature on this material is based on laboratory tests. In addition, the chemical properties of Li-SiO-C impair its processability with conventional production processes to an unusually high degree. Research has now been conducted at the ZSW into an industrial-grade process for the water-based production of anodes with a highly commercially relevant electrode design and a very high proportion of 20% Li-SiO-X in the anode active mass. The influence of binders, process additives and conductivity additives on key processing properties in the entire electrode manufacturing process was the subject of systematic investigation. Using industrial-grade systems, the scientists have successfully produced 120 metres of electrodes that are coated on both sides and boast excellent mechanical quality, with impressive cycle stability demonstrated in full cells (see images below).

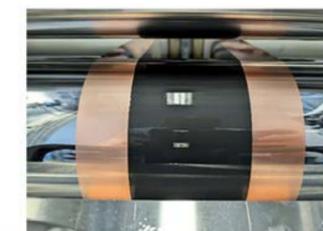


Einordnung von ersten kommerziellen Natrium-Ionen-Zellen im 18650-Format mit kommerziellen Lithium-Ionen-Rundzellen mit Graphit- und Si/Graphitanoden und unterschiedlichen Kathoden.
Classification of early commercial sodium-ion cells in 18650 format with commercial lithium-ion round cells with graphite and Si/graphite anodes and different cathodes.
K. Bischof, V. Marangon, M. Kasper, A. Aracil Regalado, M. Wohlfahrt-Mehrens, M. Hölzle, D. Bresser, T. Waldmann
J. Power Sources Adv. 27 (2024) 100148



Herstellung von Li-SiO-C-haltigen Elektroden mit herkömmlichem Prozess.

Manufacturing of Li-SiO-C-containing electrodes using a conventional process.



Herstellung von Li-SiO-C-haltigen Elektroden mit optimiertem Prozess.

Manufacturing of Li-SiO-C containing electrodes using an optimised process.

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

Dr. rer. nat. Alice Hoffmann
alice.hoffmann@zsw-bw.de
+49 731 9530-558

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 sind, desto zuverlässiger, langlebiger und kostengünstiger wird die Batterie.

Der Schwerpunkt des Fachgebietes ECP liegt in der Weiterentwicklung von Herstellprozessen zur seriennahen Produktion von Batteriezellen. Hierfür betreibt das Fachgebiet seit zehn Jahren eine europaweit einmalige »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, Herstellkosten, Inline-Sensorik, Fertigungstoleranzen und kosten-effizienten Abläufen. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um die Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Maßstab.

Das ECP-Team besteht aus erfahrenen Fachkräften aus Technik, Ingenieurwesen und Wissenschaft. Ihre Kernaufgabe ist es, im Rahmen von Industrieaufträgen und Forschungsvorhaben industrielle Produktionsprozesse zu optimieren oder fortschrittliche Zellchemie in Musterserien von Standardzellen zu verifizieren. Die Forschungskompetenz umfasst alle produktionsnahen Themen, von der Entwicklung ganzer Anlagen über die Verbesserung von Einzelprozessen bis zu Qualitätssicherungsverfahren. Mit seinen vielfältigen Produktionsanlagen wurde das Fachgebiet zum integralen Bestandteil im Dachkonzept »Forschungsfabrik Batterie« des Bundesforschungsministeriums, mit dem eine Batteriezellproduktion in Deutschland aufgebaut werden soll.

Our core areas of expertise

Series production of large lithium-ion cells, such as those used in electric cars and stationary storage facilities, places particular demands on the safety and accuracy of individual process steps. The higher the quality and reproducibility, the more reliable, long-lasting and cost-effective the battery will be.

The ECP department focuses on developing and refining manufacturing processes for pre-series production of battery cells. For the last 10 years, the department has been operating a »research platform for the industrial production of large lithium-ion cells« (FPL) – which is the only one of its kind in Europe. The work revolves around the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in relation to quality, safety, manufacturing costs, in-line sensors, production tolerances and cost-efficient processes. When it comes to new materials and components, it focuses on evaluating processability and quality on an industrial scale.

The ECP team consists of experienced technicians, engineers and scientists whose main brief is to optimise industrial production processes in the context of industrial contracts and research projects and to verify advanced cell chemistry in lines of standard cell samples. The breadth of expertise in research encompasses all production-related issues, from the development of entire systems and plants and the improvement of individual processes right through to quality control procedures. With its wide variety of production facilities, the department has become integral to the »Battery Cell Research Factory« umbrella strategy adopted by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) with a view to stepping up battery cell production in Germany.



Ausschussverwertung Elektrodenproduktion

Für den Einsatz recycelter Materialien in Lithium-Ionen-Batterien (LIB) sind die Etablierung von Qualitätskriterien und Anpassungen in der Produktion unverzichtbar. Hier setzt das vom Bundesforschungsministerium geförderte Projekt Action an, indem es die Implementierung von Rezyklaten in eine seriennahe LIB-Produktion an der Forschungsproduktionslinie des ZSW untersucht (siehe Abbildung oben).

Die Ergebnisse demonstrieren eine hohe Prozessfähigkeit für Rezyklate in einer quasi-industriellen Umgebung und deuten auf eine Verbesserung der elektrochemischen Leistung hin. Nach 500 Zyklen zeigen Zellen im industrierelevanten Design, die mit Graphit-Rezyklat hergestellt wurden, eine Kapazität von 18,53 Ah. Zellen, die mit NCM (Nickel-Kobalt-Mangan)-Rezyklat produziert wurden, erreichen eine Kapazität von 18,17 Ah. Diese Werte übersteigen die 17,95 Ah, die Referenzzellen mit konventionellen Materialien nach einer äquivalenten Zyklenanzahl aufweisen (siehe Abbildung unten). Diese Beobachtungen sind konsistent mit Ergebnissen aus der Grundlagenforschung. Die Literatur berichtet über verbesserte elektrochemische Leistungen, die mit durch Recycling eingebrachten Verunreinigungen assoziiert werden. Im Fall von Aluminium-kontaminiertem NCM wird die Leistungsverbesserung u. a. der Kompensation von Nickel-, Kobalt- und Mangan-Verlusten durch die Einbindung von Aluminium in das NCM-Kristallgitter zugeschrieben. Anodenseitig können Kupferverunreinigungen potenziell als leitfähige Additive fungieren und damit die Zelleistung verbessern.

Scrap recycling in electrode production

The establishment of quality criteria and modification of production processes are essential for the use of recycled materials in lithium-ion batteries (LIBs). This is the focus of the »Action« project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) and is tasked with investigating the use of recycled materials in pre-series LIB production on the ZSW research production line (see images above).

The results demonstrate the high processability of recycled materials in a quasi-industrial environment and indicate an improvement in electrochemical performance. Cells manufactured with recycled graphite and with a design viable for industrial use boast a capacity of 18.53 Ah after 500 cycles. Cells produced with recycled NCM (Nickel-cobalt-manganese) achieve a capacity of 18.17 Ah. These values exceed the 17.95 Ah shown by reference cells with conventional materials after an equivalent number of cycles (see image below). These observations are consistent with results from foundational research.

Studies report improved electrochemical performance associated with impurities introduced by recycling. The improvement in the performance of aluminium-contaminated NCM is attributed in part to the fact that nickel, cobalt and manganese losses are offset by the incorporation of aluminium in the NCM crystal lattice. Copper residues may potentially act as conductive additives on the anode side and thereby improve cell performance.



»Mit der erweiterten Forschungsproduktionslinie unterstützen wir unsere Partner bei der Entwicklung und Erprobung innovativer, industrietauglicher Material-, Zell- und Produktionskonzepte.«

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



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



Links: Batteriezellstapel für Pouch- und prismatische Zellen.

Left: Battery cell stacks for pouch cells and prismatic cells.

Oben: Elektrodenauschüsse stellen wertvolle Sekundärquellen für kritische Stoffe in der Batterieproduktion dar.

Above: Electrode rejects are valuable secondary sources of critical materials for battery production.

Dr. Miriam Keppeler
miriam.keppeler@zsw-bw.de
+49 731 9530-559



Optimierung des Stapelprozesses zur Produktivitätssteigerung und Kostensenkung.

Optimisation of the stacking process in order to increase productivity and reduce costs.

Effiziente Hochgeschwindigkeits-Batteriezellfertigung

Die wirtschaftliche und nachhaltige Herstellung von Batteriezellen erfordert eine kontinuierliche Reduktion von Herstellkosten und Ausschuss, während gleichzeitig Qualität, Produktivität und Nachhaltigkeit gesteigert werden müssen. Das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt HOBAZELL widmet sich schwerpunktmäßig der Produktivitätssteigerung in der Batterieproduktion. Im Vorhaben wird ein vollautomatisierter, kontinuierlicher Stapel- und Befüllprozess für Pouch- und prismatiche Zellen entwickelt, um den Durchsatz zu steigern und somit die Herstellkosten zu reduzieren. Zusätzlich wird an einer sensorgestützten Prozessdatenüberwachung zur Qualitätskontrolle in Echtzeit und einer energie- und ressourceneffizienten Produktion geforscht, um den ökologischen Fußabdruck der Zellfertigung weiter zu reduzieren. Das Projekt HOBAZELL leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung der Batteriezellfertigung und zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit nachhaltiger Energiespeichersysteme.

Efficient high-speed battery cell production

Economical and sustainable battery cell production call for continuous reductions in manufacturing costs and waste accompanied by an increase in quality, productivity and sustainability. Funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), the HOBAZELL project focuses on increasing productivity in battery production. The project involves the development of a fully automated, continuous stacking and filling process for pouch cells and prismatic cells in order to increase throughput and thereby reduce manufacturing costs. Research is also being carried out on a sensor-based process data monitoring system for real-time quality control along with an energy-efficient and resource-efficient production line to further reduce the ecological footprint of cell production. The HOBAZELL project is therefore making an important contribution to advancing battery cell production and boosting the competitiveness of sustainable energy storage systems.

Optimierung des Laserschneidprozesses (Minimierung von Partikeln).

Optimising the laser cutting process (particle minimisation).

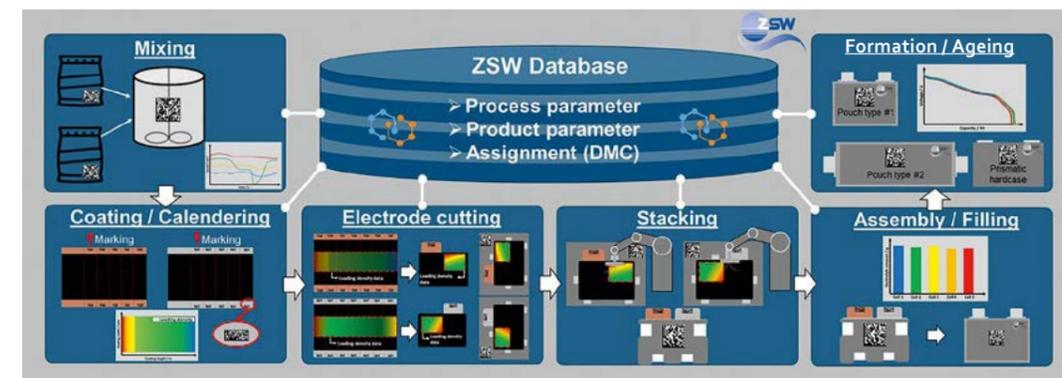


Tracking und Tracing in der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien

Der Aufbau einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Batteriezellproduktion bleibt eine Herausforderung, die Deutschland bewältigen muss, um im globalen Wettbewerb als Anbieter im Bereich Elektromobilität eine führende Position einzunehmen. Die Umsetzung dieser Vision wird durch Industrie 4.0-Anwendungen unterstützt, die eine Transformation der Produktion hin zu effizienteren Prozessen, höherer Qualität und Kosteneinsparungen ermöglichen. Das Forschungsprojekt TrackBatt (gefördert vom Bundesforschungsministerium) zielt daher darauf ab, einen Ansatz zur Rückverfolgung (»Tracking und Tracing«, kurz T&T) von Prozess- und Produktdaten einzelner Zellen und deren Zwischenprodukten in der Batterieproduktion zu entwickeln und diesen prototypisch umzusetzen (siehe Abbildung). Durch die Integration von intelligenter Sensorik konnte eine umfassende Datenerfassung während der Produktion realisiert werden. Dadurch war es möglich, einerseits Prozessschwankungen zu kontrollieren und zu optimieren und andererseits Zusammenhänge aller relevanten Prozessparameter zu generieren. Auf diese Weise lassen sich Leistung und Qualität der hergestellten Batteriezellen auf die Produktionsprozesse und -parameter abstimmen. Dies wiederum ermöglicht eine Inline-Prozessoptimierung, die das Ausschleusen ganzer Zellchargen verhindert. Darüber hinaus kann ein digitaler Zwilling des Produktionssystems erstellt werden, durch den datengestützte Wertstromanalysen etabliert werden können.

Tracking and tracing in the production of lithium-ion batteries

Establishing economically viable and sustainable battery cell production remains a challenge that Germany must overcome if it is to secure a leading position on e-mobility in the global arena. Realisation of this vision is supported by Industry 4.0 applications, which are enabling a transformation in production towards more efficient processes, higher quality and cost savings. »TrackBatt« research project (funded by the Federal Ministry of Education and Research) therefore aims to develop a solution for tracking and tracing (T&T) of process data and product data of individual cells and their intermediate products in battery production, and to implement a prototype for this approach (see diagram). The integration of intelligent sensors has allowed full data collection during the production process. This has made it possible, on the one hand, to control and optimise process fluctuations and, on the other hand, to generate links between all relevant process parameters. In this way, the performance and quality of the battery cells produced can be tailored to production processes and production parameters. This in turn enables in-line process optimisation, preventing the rejection of entire batches of cells. A digital twin of the production system can also be produced to facilitate data-based value stream mapping.



T&T-System in der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien am ZSW.

T&T system in the production of lithium-ion batteries at the ZSW.

Sebastian Lukas, M.Sc.
sebastian.lukas@zsw-bw.de
+49 731 9530-362

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

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, 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. Dafür stehen drei Sicherheitstestbunker inklusive einer mehrstufigen Abgasreinigung zur Verfügung. Herzstück des Teams Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Simulation von Zellen und Batteriesystemen inklusive Algorithmen für den Batteriezustand und das Batteriemangement. Erforscht werden weiterhin die optimale Laderegulierung unter Schnellladebedingungen, auch mittels High Precision Coulometry (HPC), der Einfluss von Rippelströmen sowie von mechanischen Kompressionskräften auf die Performance, die zu erwartende Lebensdauer und die Sicherheit.

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. The research is primarily devoted to lithium-ion cells and lithium-ion systems but also to 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 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 multistage exhaust gas cleaning system.

The battery system technology team is mainly 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.



»Leistungsfähige Batterien, sowohl in mobilen als auch vermehrt in stationären Anwendungen, sind Teil der voranschreitenden deutschland- und weltweiten Energiewende. Mit verlässlichen und unabhängigen Untersuchungen an Zellen, Modulen und Batterien tragen wir im Batterietestzentrum des ZSW unseren Anteil zu deren Weiterentwicklung und breiteren Nutzung bei.«

»High-performance batteries in both mobile and, increasingly, stationary applications are integral to the energy transition advancing across Germany and worldwide. In carrying out reliable and independent tests on cells, modules and batteries here at the ZSW battery test centre, we are doing our part to contribute to their development and more widespread use.«



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

High Precision Coulometry (HPC) bei hohen Stromraten erlaubt verkürzte Alterungsuntersuchungen

Zyklische Alterungsuntersuchungen sind häufig aufgrund der Untersuchungsdauer und der hohen Anzahl an Messkanälen aufwendig und kostspielig. Darüber hinaus sollte zumindest die obere Spannungsgrenze von Lithium-Ionen-Zellen temperatur- und stromabhängig festgesetzt werden, um verstärkte Alterungseffekte durch Lithiumabscheidungen (plating) auf der negativen Elektrode zu verhindern.

Eine Alternative zu zyklischen Alterungsuntersuchungen kann die High Precision Coulometry (HPC) bieten, die aufgrund der hohen Genauigkeit der Strom- und Zeitmessung eine hochpräzise Bestimmung von Ladungsmengenwirkungsgraden liefert. Die HPC nutzt den Fakt, dass jedes Elektron, das nach einem Ladevorgang nicht wieder entladen werden kann, zu Nebenreaktionen und damit zur Alterung der Lithium-Ionen-Zellen beiträgt.

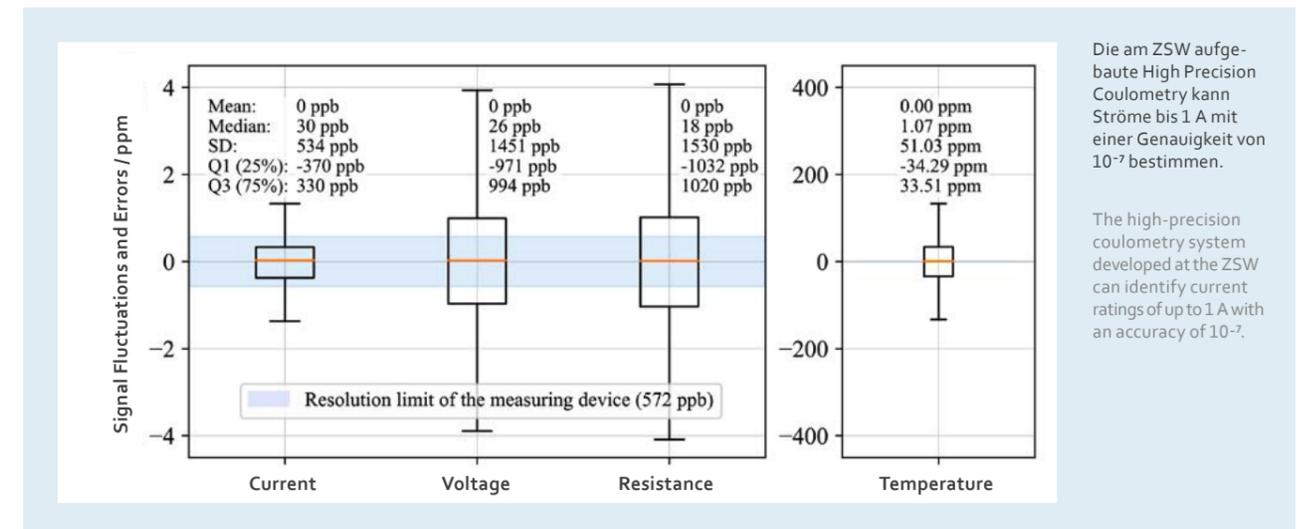
Im Batterietestzentrum des ZSW wurden nun HPC-Anlagen entwickelt, getestet und aufgebaut, die für Ströme bis 1 A eine Genauigkeit von 10^{-7} liefern (siehe Abbildung). Für praktische Anwendungen sind jedoch weitaus größere Ströme relevant. Daher wurde zusätzlich eine HPC-Anlage entwickelt, getestet und aufgebaut, die Ladungsmengenwirkungsgrade bei Strömen von zunächst bis zu 150 A mit einer Genauigkeit von 10^{-5} sicher bestimmen kann. Alterungsuntersuchungen sind nun bei verkürzten Messdauern durchführbar.

High-precision coulometry (HPC) at high current rates allows shortened ageing tests

Cyclic ageing tests are often complex and expensive because of the duration of the tests and the high number of measurement channels. In addition, at least the upper voltage limit setting for lithium-ion cells should be dependent on the temperature and current in order to prevent increased ageing effects due to lithium plating on the negative electrode.

High-precision coulometry (HPC) offers an alternative to cyclic ageing tests, as it provides an exact assessment of charge quantity efficiency levels due to the high accuracy of current measurement and time measurement. HPC exploits the fact that every electron that cannot be discharged again after a charging process contributes to side reactions and, therefore, to the ageing of the lithium-ion cells.

HPC systems have now been developed, tested and built in the ZSW battery test centre which deliver an accuracy of 10^{-7} for current ratings of up to 1 A (see figure below). However, practical applications involve far higher currents. This prompted the development, testing and construction of an additional HPC system that can reliably identify charge quantity efficiency levels in current ratings of up to 150 A in the first instance with an accuracy of 10^{-5} . Ageing tests can now be carried out with shorter measurement times.



Die am ZSW aufgebaute High Precision Coulometry kann Ströme bis 1 A mit einer Genauigkeit von 10^{-7} bestimmen.

The high-precision coulometry system developed at the ZSW can identify current ratings of up to 1 A with an accuracy of 10^{-7} .

Sebastian Frankl
sebastian.frankl@zsw-bw.de
+49 731 9530-398

Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

Unsere Kernkompetenzen

Die Arbeiten des Fachgebiets ECG befassen sich mit Fragen der saisonalen Energiespeicherung mittels kostengünstiger wiederaufladbarer Batterien mit wässrigen Elektrolyten sowie Elektroden für Brennstoffzellen und Elektrolyseuren mit Polymermembranelektrolyten (PEM) zur Nutzung und Erzeugung von Wasserstoff. Aufgrund der anhaltenden öffentlichen Debatte um ein Verbot perfluorierter Verbindungen (PFAS) erlangt der Einsatz fluorfreier Polymerelektrolyte zunehmende Bedeutung. Ferner ist das Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe in Brennstoffzellen und Elektrolyseuren entscheidend für die Leistung, Lebensdauer und Kosten von PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseuren.

Hierbei kommen klassische elektrochemische Methoden wie die Aufnahme von Lade-Entlade-Kurven, Voltammetrie und Impedanzspektroskopie sowie fortgeschrittene bildgebende Verfahren wie Röntgen-, Synchrotron- und Neutronentomographie in operando oder hochauflösende Elektronenmikroskopie und Raster-Kraftmikroskopie zum Einsatz.

Das Fachgebiet ECG verfügt über langjährige Erfahrung mitsamt der notwendigen Infrastruktur, um völlig neue technologische Ansätze aufzugreifen und diese im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren. Der Einsatz neuer Materialien und Herstellverfahren erlaubt die Entwicklung umweltfreundlicher und leistungsstarker Energiespeichertechnologien und den Einsatz umweltschonender, recyclingfähiger und in großen Mengen vorhandener Rohstoffe.

Our core areas of expertise

The work of the ECG department revolves around questions about seasonal energy storage using cost-effective rechargeable batteries with aqueous electrolytes as well as electrodes for fuel cells and polymer electrolyte membrane (PEM) electrolyzers for the use and production of hydrogen. The use of fluorine-free polymer electrolytes is increasingly important due to the ongoing public debate regarding a ban on perfluorosulfonic acids (PFAS). The corrosion behaviour of metallic materials in fuel cells and electrolyzers is also a key factor in the performance, service life and costs of PEM fuel cells and electrolyzers.

Conventional electrochemical methods, such as recording charge-discharge curves, voltammetry and impedance spectroscopy, are deployed alongside advanced imaging techniques like X-ray, synchrotron and neutron tomography in operando, high-resolution electron microscopy and atomic force microscopy.

The ECG department has many years of experience and the necessary infrastructure to adopt completely new approaches and to verify and demonstrate technologies in the laboratory.

The deployment of new materials and manufacturing processes will allow the development of environmentally friendly and high-capacity energy storage technologies and the use of eco-friendly and recyclable raw materials of which there is a plentiful supply.



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



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

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

Wiederaufladbare Akkumulatoren mit Zink-Elektrode

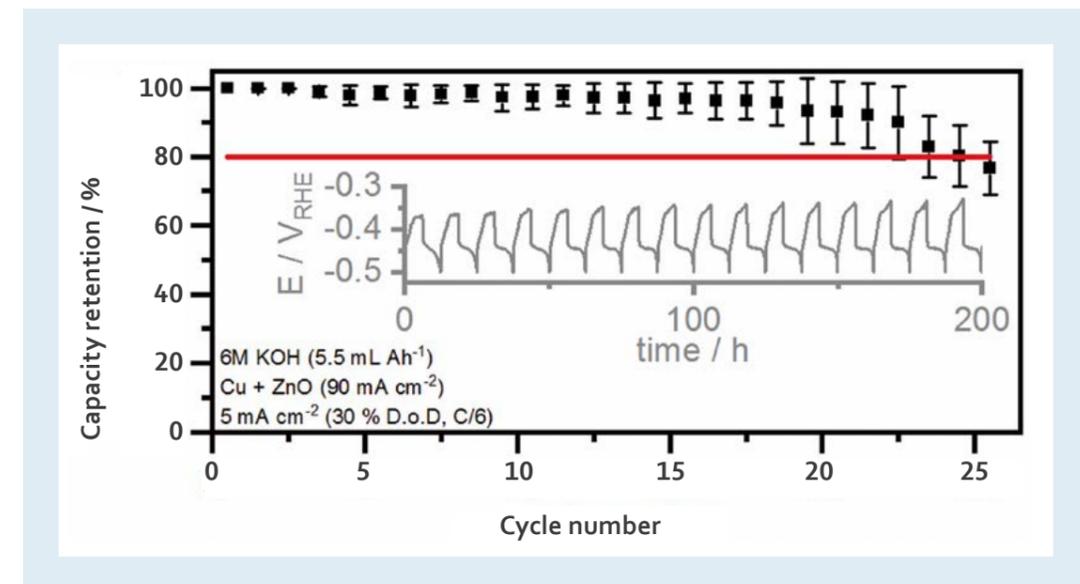
Die saisonale Energiespeicherung stellt besondere Herausforderungen an die Kosten und Sicherheit der eingesetzten Akkumulatoren. Zink-Manganoxid- und Zink-Luft-Systeme bieten hier vielversprechende Ansätze. Am ZSW konnten in der Vergangenheit in Zellen mit hohem Elektrolytüberschuss mehr als 100 Zyklen an wiederaufladbarem Manganoxid, ebenso in reversiblen Luftelektroden erreicht werden.

Eine Herausforderung stellt dabei nach wie vor die Zinkelektrode aufgrund der Formveränderung und der Neigung zu nadelförmiger Zinkabscheidung während des Ladens dar, besonders beim Einsatz von Zellen mit geringen Elektrolytmengen und einer Entladung von mehr als 10 % der Nennkapazität. Durch Optimierung der Elektrodenmikrostruktur und dem Einsatz von Elektrolyt- und Elektrodenadditiven konnten in einer Zink-Luft-Zelle jedoch mehr als 25 Zyklen bei einer Entladetiefe von 30 % erreicht werden (siehe Abbildung unten).

Rechargeable batteries with zinc electrodes

Seasonal energy storage poses particular challenges in terms of the costs and safety of the rechargeable batteries used. Zinc-manganese oxide and zinc-air systems are promising as viable approaches. In the past, the ZSW was able to achieve more than 100 cycles of rechargeable manganese oxide in cells with a high excess of electrolyte, even in reversible air electrodes.

The zinc electrode continues to pose a challenge due to the change in shape and the tendency to needle-shaped zinc deposition during the charging process, especially when using cells with low electrolyte quantities and discharging more than 10% of the nominal capacity. By optimising the electrode microstructure and using electrolyte and electrode additives, however, more than 25 cycles at a depth of discharge of 30% has been achieved in a zinc-air cell (see figure below).



Nennspannung einer Zn-MnO₂-Zelle unter der Annahme, dass keine Polarisation an der Zn-Elektrode auftritt, bei verschiedenen Entladeraten (C-Rate).

Nominal voltage of a Zn-MnO₂ cell assuming an absence of polarisation at the Zn electrode at different discharge rates (C-rate).

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

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

Fluorfreie ionenleitende Polymere für PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseure

Perfluorierte polymere Sulfonsäuren (PFSA) werden heute als Membranen und als ionenleitende Binder in Brennstoffzellen und Elektrolyseuren eingesetzt. Wegen ihrer Beständigkeit in der Umwelt sollen sie in Europa verboten werden.

Sulfonierte Polyphenylensulfone (sPPS) sind fluorfrei und zeigen hohe Leitfähigkeiten und Beständigkeiten bei ähnlichen Leistungscharakteristiken in Brennstoffzellen mit PFSA- und sPPS-Membranen bei PFSA-gebundenen Elektroden (siehe Abbildung links).

Beim Einsatz von PFSA in den Elektroden wurde eine starke Reduktion der katalytischen Aktivität beobachtet (siehe Abbildung rechts). Weitere Untersuchungen zeigen Wechselwirkungen von sPPS mit dem Platin-Katalysator und Veränderungen der Elektrodenstruktur.

Um Katalysator-Ionomer-Wechselwirkungen zu minimieren, werden in weiterführenden Arbeiten die Elektrodenzusammensetzung und die Einfahrprozedur der Elektroden angepasst.

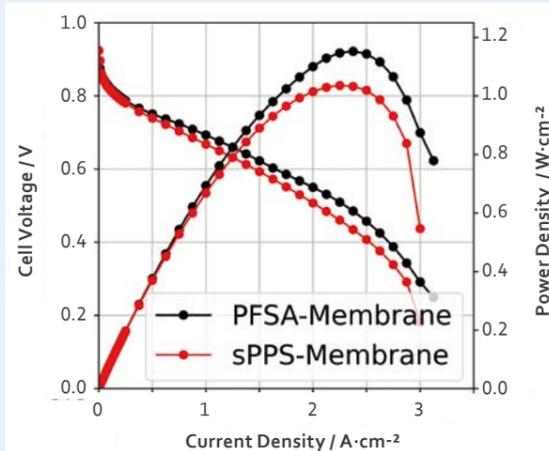
Fluorine-free ion-conducting polymers for PEM fuel cells and electrolyzers

Perfluorinated polymeric sulfonic acids (PFSA) are currently used as membranes and ion-conducting binders in fuel cells and electrolyzers. There are plans to ban them in Europe because of environmental concerns relating to their resistance.

Sulfonated polyphenylene sulfones (sPPS) are free of fluorine and show high levels of conductivity and resistance with the same performance characteristics in fuel cells with PFSA and sPPS membranes with PFSA-bonded electrodes (see figure below, left).

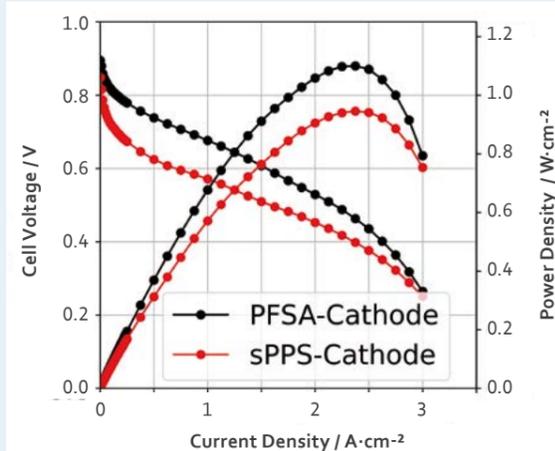
When PFSA was used in the electrodes, a strong reduction in catalytic activity was observed (see figure below, right). Further investigations show interactions of sPPS with the platinum catalyst and changes in the electrode structure.

In order to minimise catalyst-ionomer interactions, further work is being carried out on modifications to the electrode composition and the electrode run-in procedure.



Vergleich der Kennlinien von Brennstoffzellen mit PFSA- (schwarz) und sPPS- (rot) Membran und PFSA-gebundenen Elektroden.

Comparison of the characteristic curves of fuel cells with PFSA (black) and sPPS (red) membrane and PFSA-bonded electrodes.



Vergleich der Kennlinien von Brennstoffzellen mit PFSA- (schwarz) und sPPS- (rot) Ionomer-gebundenen Elektroden.

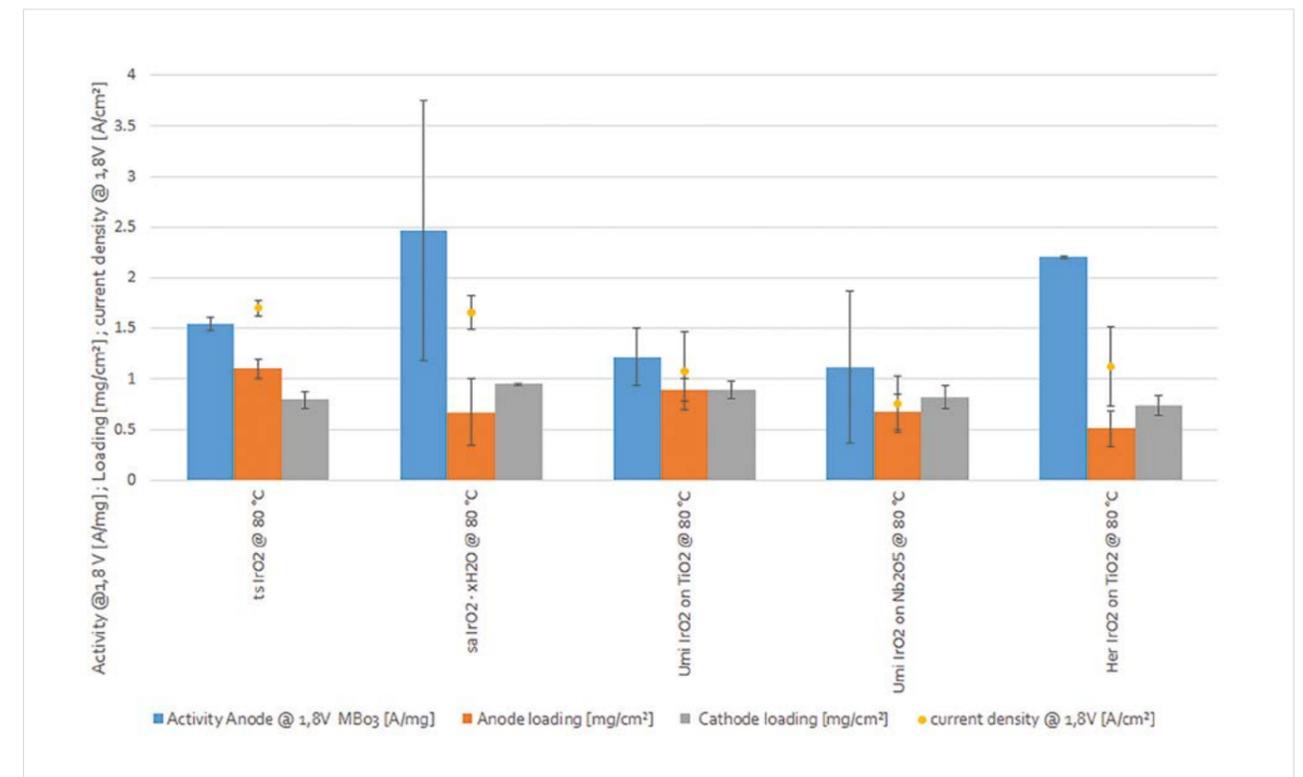
Comparison of the characteristic curves of fuel cells with PFSA (black) and sPPS (red) ionomer-bonded electrodes.

Anodenkatalysator-Screening für PEM-Elektrolyseur

Die Wasserstoffherzeugung mittels Wasserelektrolyse spielt zukünftig eine wichtige Rolle bei der Integration von Sonnen- und Windenergie in die Energieversorgung. PEM-Elektrolyseure eignen sich besonders dafür, auf schnelle Lastwechsel zu reagieren, benötigen aber wegen des Elektrolyten Edelmetallkatalysatoren und dafür das rare und teure Edelmetall Iridium. Wie bei Brennstoffzellen soll der Iridiumbedarf durch den Einsatz eines inerten Trägers reduziert werden. In einer vergleichenden Untersuchung wurden verschiedene ungeträgerte und geträgerte Iridiumoxid (IrO_2)-Katalysatoren in Membran-Elektrodenanordnungen (MEA) getestet. Obwohl MEAs mit ungeträgerten Katalysatoren höhere flächenspezifische Stromdichten zeigten, konnten mit geträgerten Katalysatoren hohe massenspezifische Aktivitäten bei einer Anodenbelastung von nur 1 mg cm^{-2} erreicht werden (siehe Abbildung).

Anode catalyst screening for PEM electrolyzers

In the future, hydrogen production through hydrolysis of water will play an important role in integrating solar and wind into energy supply systems. PEM electrolyzers are particularly well suited to responding to rapid load fluctuations. Due to the electrolyte, however, they require precious metal catalysts – specifically iridium, which is a rare and expensive noble metal. As with fuel cells, the use of iridium is to be reduced by using an inert carrier. In a comparative study, various unsupported and supported iridium oxide (IrO_2) catalysts were tested in membrane electrode assemblies (MEAs). Although MEAs with unsupported catalysts showed higher area-specific current densities, it was possible to achieve high mass-specific activities with supported catalysts at an anode load of only 1 mg cm^{-2} (see figure).



Vergleich der Aktivitäten von katalysatorbeschichteten Membranen (CCM) mit verschiedenen Anodenkatalysatoren bei unterschiedlichen Temperaturen auf einer 25 cm^2 N115-Membran bei 12 ml/min Wasser auf Anode und Kathode.

Comparison of the activities of catalyst-coated membranes (CCMs) with different anode catalysts at different temperatures on 25 cm^2 n115 membrane at 12 ml/min water on anode and cathode.

Didem Yazili-Marini
didem.yazili-marini@zsw-bw.de
+49 731 9530-210

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

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, Charakterisierung und Simulation von PEMFC-Stacks und -Komponenten im Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 150 kW_{el}. Eine weitere Kernkompetenz liegt im Bau von Prototypen und der Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien.

Brennstoffzellen werden auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit optimiert. Das umfasst u. a. das Verständnis von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Außerdem entwickelt ECB manuelle und automatisierte Herstelltechniken für PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Entwicklungsarbeiten bei der Stackassemblierung im Rahmen des HyFaB-Projekts. Hierzu gehören u. a. 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 wird u. a. mittels einer μ -CT-Anlage untersucht. Damit können Strukturen von GDL auch im komprimierten Zustand einschließlich Wasserhaushalt abgebildet werden. Ergänzend stehen am ZSW Analysetechniken zur Oberflächen- und Strukturcharakterisierung (z. B. FIB-SEM) sowie mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) 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

Our core areas of expertise

The ECB department specialises in the development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs). The focus is on the design, characterisation and simulation of PEMFC stacks and PEMFC components in a power range from just a few watts through to 100 kW_{el}. Other key specialisms include the construction of prototypes and the development of manufacturing and testing technologies.

Fuel cells are optimised for enhanced performance, service life, efficiency and compactness. This involves understanding ageing processes and analysing faults. ECB also develops manual and automated manufacturing technologies for PEMFC components, cells and stacks. One aspect of particular importance is development work on stack assembly in the HyFaB project, 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. Water management within the gas diffusion layers (GDL) and gas distribution structures is examined in various ways, one of which is using a μ -CT system. This allows the GDL structures to be mapped, 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 (HZB), with resolutions ranking among the best in the world.



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

»Our work focuses on optimising fuel cells and all their components in terms of their design, production, performance and service life.«



Optimierung von Brennstoffzellenkomponenten: metallische Bipolarplatten.

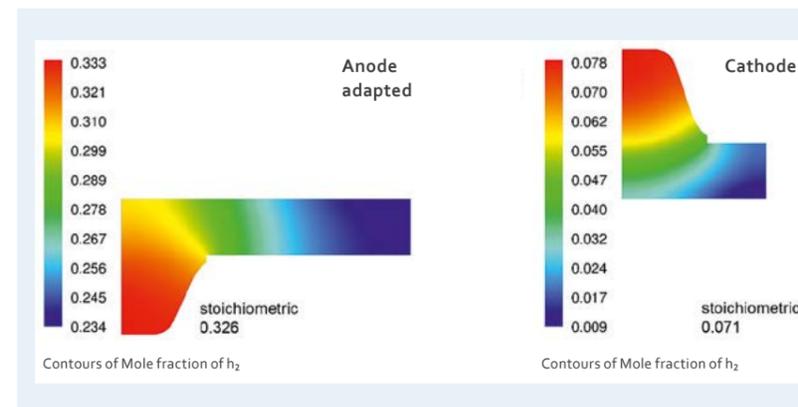
Optimisation of fuel cell components: metallic bipolar plates.

Projekt CellForm – metallische Bipolarplatte mit filigranen Flowfieldstrukturen

Die Bipolarplatte (BPP) ist eine Kernkomponente von Brennstoffzellen-Stackeln. Sie verteilt Gase, temperiert den Stack, entfernt Produktwasser und sorgt für die elektrische Kontaktierung der Einzelzellen. Um die Anforderung der Medienverteilung zu erfüllen, sind auf den BPP Strukturen aufgebracht, welche eine möglichst gleichmäßige Medienversorgung gewährleisten. Im Projekt CellForm, gefördert vom Bundesverkehrsministerium, stehen die Verbesserung der Stackeffizienz und die Steigerung der Leistungsdichte in Form einer Spannungs- und Stromstärkerhöhung einer Zelle und damit auch des gesamten Zellstapels im Vordergrund. Der zentrale Ansatz zur Erreichung dieser Ziele ist die Realisierung möglichst feiner Kanal-Steg-Strukturen im Flowfield der BPP. Hierbei wird auf die spezielle Umformtechnologie der Firma Gebhardt Werkzeug- und Maschinenbau GmbH und ihrer Tochtergesellschaft CellForm Hydrogen GmbH zurückgegriffen, welche geeignete Voraussetzungen für die Realisierung solcher feinen Strukturen bietet. In umfangreichen CFD-Simulationen (computational fluid dynamics) wurden die bestgeeigneten Flowfieldstrukturen identifiziert und diese unter dem Aspekt der Herstellbarkeit bewertet. Die ausgewählte Geometrie wird zur Erstellung einer vollständigen Hochleistungs-Bipolarplattengeometrie verwendet. Die Abbildung zeigt die simulierte Reaktandenkonzentrationsverteilung bei einer Stromdichte von 3 A/cm².

CellForm project – metallic bipolar plate with sophisticated flow field structures

One of the core components of fuel cell stacks is the bipolar plate (BPP). It distributes gases, regulates temperature in the stack, removes product water and ensures electrical contact between the individual cells. In order to fulfil the requirement of media distribution, structures are applied to the BPP that ensure the most even media supply possible. Funded by the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV), the »CellForm« project focuses on improving stack efficiency and increasing power density by raising the voltage and current strength of a cell and, by extension, of the entire cell stack. The main approach is to make the channel and rib structures in the BPP flow field as fine as possible. Suitable conditions for the execution of such fine structures are found in the special forming technology used at Gebhardt Werkzeug- und Maschinenbau GmbH and its subsidiary CellForm Hydrogen GmbH. The most suitable flow field structures were identified in extensive CFD (computational fluid dynamics) simulations and then evaluated in terms of their producibility. The selected structures will be used to establish the perfect high-performance bipolar plate geometry. The figure below shows the simulated reactant concentration distribution at a current density of 3 A/cm².



Mittels CFD-Simulationsergebnisse – Querschnitt der anoden- und kathodenseitigen Reaktandenverteilung bei einer Stromdichte von 3 A/cm².

Simulation results obtained by CFD: cross-section of anodic and cathodic reactant distribution at a current density of 3 A/cm².

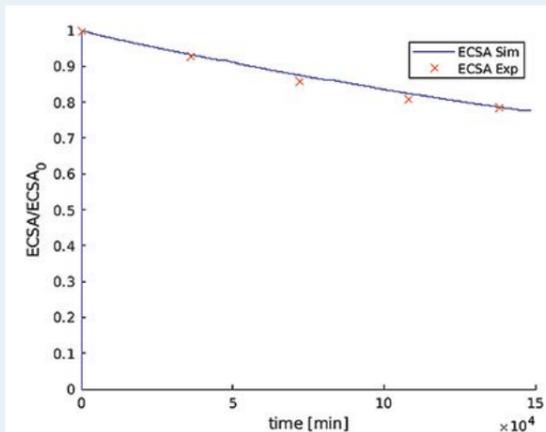
Frank Häußler
frank.hauesler@zsw-bw.de
+49 731 9530-791

1D-Performance Modellierung unter Berücksichtigung elektrochemischer Alterungseinflüsse

Im Projekt »Digitalization for Sustainability« (»DigiTain«, Bundeswirtschaftsministerium) sollen Prozesse, Methoden und Modelle zur volligitalen Produktentwicklung entwickelt und zertifiziert werden. Die Aufgabe des ZSW besteht u. a. in der Entwicklung eines Brennstoffzellen-Alterungsmodells. Im Projektverlauf soll dieses Modell in das Systemmodell eines Projektpartners integriert werden und dort die Stackkomponente darstellen. Die Grundlage für das Alterungsmodell bildet ein in Matlab entwickeltes 1D-Modell, das Spannungsverläufe in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen und Schadgaskonzentrationen berechnen kann. Das erweiterte Degradationsmodell bildet den Einfluss der elektrochemischen Vorgänge im Katalysator und der Membran auf die Zellspannung ab. Speziell wird der Verlust der aktiven Platin-Oberfläche (ECSA) aufgrund der Änderung von Partikelverteilung und Kohlenstoffkorrosion sowie der verminderte Sauerstofftransport aufgrund von Dehydrophobierungseffekten betrachtet. In der Membran kommt es zur Zersetzung durch Radikale, Bildung von Löchern und Besetzung durch Fremdionen. Diese Vorgänge sind im Modell integriert und werden derzeit mit experimentellen Daten verglichen. Ein erster Abgleich mit einem ca. 2.500 h-Profil wurde bereits durchgeführt. Die Abbildung (links) zeigt die ECSA-Abnahme und die Abbildung (rechts) einen Vergleich der Polarisationskurven (Begin of Test BOT – End of Test EOT).

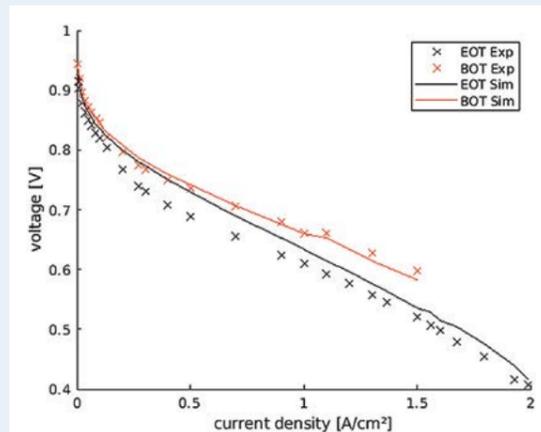
1D performance modelling taking account of electrochemical ageing influences

The »Digitalisation for Sustainability« (DigiTain) project, which is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK), aims to develop and certify processes, methods and models for fully digital product development. The tasks assigned to the ZSW include developing a model for fuel cell ageing. In the course of the project, this model is to be integrated into a system model belonging to a project partner, where it will represent the stack component. The basis for the ageing model is a 1D model developed in Matlab, which can calculate voltage curves depending on the operating conditions and pollutant gas concentrations. The extended degradation model depicts the influence of the electrochemical processes in the catalyst and membrane on the cell voltage. Particular attention is paid to the loss of the active platinum surface (ECSA) on account of the change in particle distribution and carbon corrosion, and to the reduced oxygen transport due to dehydrophobisation effects. In the membrane, this leads to decomposition by radicals, formation of holes and occupation by foreign ions. These processes are integrated in the model and are compared at present with experimental data. An initial comparison with a profile of around 2500 hours has already been carried out. In the figure below, the left-hand graph depicts ECSA reduction, while the right-hand diagram shows a comparison of the polarisation curves (BOT = beginning of test; EOT = end of test).



Modellierte und experimentell ermittelte ECSA-Abnahme über einen Dauertest von 2.500 h.

ECSA decrease over a 2500-hour endurance test as simulated and identified in experiments.



Vergleich der entsprechenden BoT- und EoT-Strom-Spannungskurven. Kreuze: experimentell gemessene Daten, Linie: simulative Ergebnisse.

Comparison of the relevant BOT and EOT current-voltage curves. Crosses: measurements plotted in experiments. Lines: simulation results.

Theresa Uhlemayr
theresa.uhlemayr@zsw-bw.de
+49 731 9530-162



LKW-tauglicher Brennstoffzellenstack aus der neuen Stapelanlage.

Truck-compatible fuel cell stack from the new stacking system.

Referenzstapelanlage für PEM-Brennstoffzellen

Bei der Herstellung von PEM-Brennstoffzellenstacks sind derzeit manuelle oder halbautomatische Prozesse vorherrschend. Die Implementierung einer vollautomatisierten Fertigung befindet sich noch in der Entwicklung und bedarf weiterer Untersuchungen zur Optimierung und Validierung ihrer Anwendung. Im Rahmen des Ausbaus der HyFaB-Forschungsfabrik wurde eine Referenzstapelanlage beschafft und in Betrieb genommen, mit der sich zahlreiche Produktionsparameter evaluieren lassen. Die vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg in Verbindung mit EFRE-Mitteln geförderte Anlage besitzt ein hochauflösendes optisches System zur Erkennung potentieller Fehlstellen auf der Membran-Elektroden-Einheit sowie der Bipolarplatte.

Im Rahmen des Projekts »RefStackMEAs«, gefördert vom Bundesverkehrsministerium, werden derzeit der Einfluss von Fertigungstoleranzen über Stapelungen der Wiederholeinheiten (siehe Abbildung oben links) mit einem definierten Versatz untersucht und so Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit erarbeitet. Weiterhin werden Anforderungen an die Reinheit im Fertigungsprozess durch die Bestimmung des Einflusses gezielter Verunreinigungen auf die Performance des Stacks ermittelt. Darüber hinaus wird die Anlage zur Fertigung des vom ZSW gemeinsam mit einem Industriepartner entwickelten generischen Stacks genutzt. Bei dem generischen Stack handelt es sich um eine quelloffene PEM-Brennstoffzellen-Plattform für Forschungs- und Entwicklungszwecke mit dem Stand der Technik bei mobilen Anwendungen entsprechenden Leistungsdaten (siehe Abbildung oben rechts).

Reference stacking system for PEM fuel cells

The production of PEM fuel cell stacks currently consists predominantly of manual and semi-automated processes. Fully automated production is still under development and requires further research to optimise and validate its application. A reference stacking system was purchased and put into operation as part of the expansion of the HyFaB reserach factory. This system can be used to evaluate a number of production parameters. Funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, Labour and Tourism in conjunction with an ERDF grant, the system has a high-resolution optical system to detect potential defects on the membrane electrode assembly and on the bipolar plate.

In the »RefStackMEAs« project, which is funded by the Federal Ministry for Digital and Transport (BMDV), research is examining the influence of manufacturing tolerances on the stacking of the repeat units (figure above, left) with a defined offset with a view to determining the specifications for manufacturing accuracy. Standards required in respect of cleanliness in the manufacturing process are also being deduced by assessing the influence of specific impurities on the performance of the stack. The system will also be used to produce the generic stack developed by the ZSW together with an industry partner. The generic stack is an open-source PEM fuel cell platform for research and development purposes with state-of-the-art performance data in mobile applications (figure above, right).

Tobias Ernst
tobias.ernst@zsw-bw.de
+49 731 9530-124

Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)

Unsere Kernkompetenzen

Das ZSW betreibt seit 2001 in Ulm ein Brennstoffzellentestzentrum mit mehr als 40 Testständen bis 250 kW. Der Fokus liegt auf der professionellen Dauererprobung von Brennstoffzellenstapeln, -systemen und -systemkomponenten. Die Tests liefern Daten zur Bewertung der Alterung, Lebensdauer und Robustheit. Die Auswertung erfolgt mittels umfangreicher Analytik und komplexer Methoden zur Fehleranalyse – auch KI-basiert. Das Testdatenarchiv umfasst mittlerweile mehr als 1 Mio. Betriebsstunden.

In die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen und -systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen sowie für Fahrzeuge fließen jahrzehntelange Forschungsarbeiten und Industrieerfahrungen 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.

Die ganzheitliche Betrachtung von Wasserstoff als Kraftstoff bildet den dritten Schwerpunkt des Fachgebiets. 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



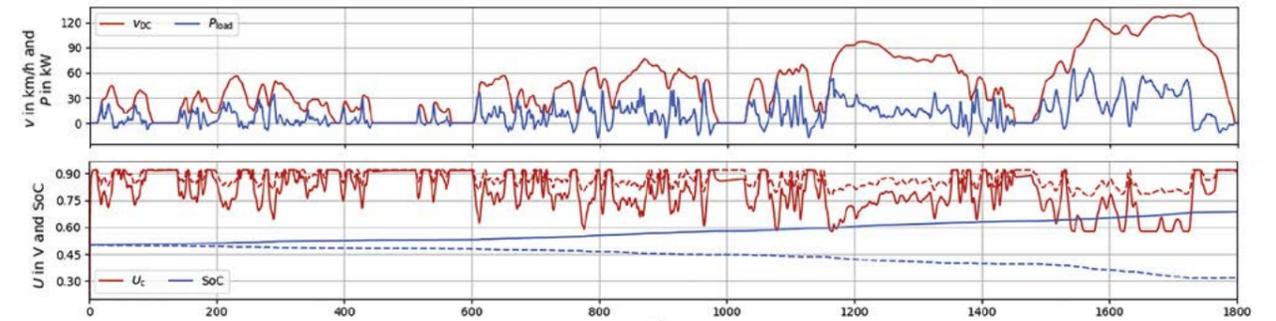
»Langfristig sind die weltweiten Klimaziele ohne Wasserstofftechnologien nicht zu erreichen. Jetzt ist es entscheidend, Wasserstoff in unseren Alltag zu integrieren.«

» 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 in Ulm since 2001 with more than 40 test rigs 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.

Many decades of research and industrial experience have gone into developing fuel cell systems and fuel cell system components for stationary systems, on-board and emergency power supply systems and applications in vehicles. Services include testing and optimisation of design and operating strategies for hybrid systems through to market readiness. The ECS department 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 team is involved in several projects working towards the development of the European hydrogen infrastructure. These projects concern proof of compliance with international fuelling standards for hydrogen filling stations, with regard to their acceptance in accordance with DIN ISO 19880 as well as conformity with the hydrogen quality required for fuel cell operation pursuant to ISO 14687-2.



Multikriterielle Optimierung hybrider Brennstoffzellensysteme

Der Betrieb von Brennstoffzellensystemen (BZS) hängt von einer Reihe von Einflussfaktoren ab, deren elektrochemische und physikalische Wechselwirkungen noch nicht vollumfänglich verstanden werden. Die dadurch gegebene Komplexität der BZS begrenzt die Anwendbarkeit und den Erfolg der Technologie. Um ihr Potenzial zu nutzen, wurde am ZSW in Zusammenarbeit mit der Hochschule München eine Werkzeugkette entwickelt, die Systemarchitekten bei der Auslegung und dem Betrieb solcher komplexer Systeme unterstützen soll.

Als Proof of Concept wurde ein BZS-Modell erweitert, um Alterungseffekte auf BZ-Stackebene und Antriebsstrangkomponenten auf Systemebene abzubilden. Das Modell deckt wesentliche Wechselwirkungen auf der Antriebsstrangebene ab und ermöglicht die gleichzeitige Parametrierung von Auslegung und Betriebsführung der Systemkomponenten. Angesichts des erheblichen Rechenaufwands für die wiederholten Simulationen (siehe Abbildung oben) werden hocheffiziente Optimierungsalgorithmen sowie statistische Lernmethoden eingesetzt. Dadurch können technologische Potenziale in Form von Zielgrößenkonflikten und Auswirkungen von Einflussfaktoren strukturell ausgewertet werden. Systemarchitekten können somit direkt eine jeweils »bestmögliche« Lösung für ihr komplexes Problem strukturiert erfassen, was einen deutlichen Mehrwert gegenüber bisherigen Entwicklungsmethoden darstellt (siehe Abbildung unten).

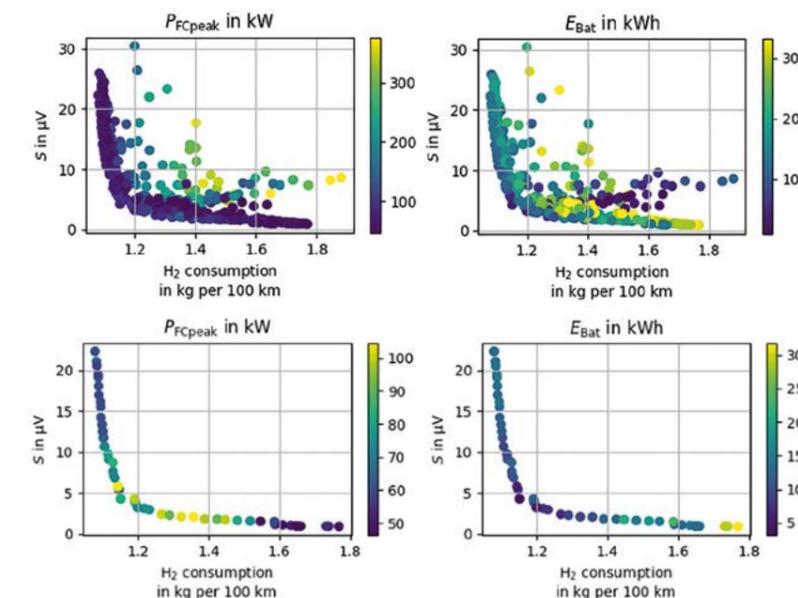


Abb. links: Simulation der BZ-Degradation u. H₂-Verbrauch basierend auf BZ-Leistung und Batteriekapazität. 500 Datenpunkte entsprechen der Gesamtheit der Simulationen (oben); Pareto front approximation der Pareto-Front (unten).

Left: Simulation of fuel cell degradation and H₂ consumption based on performance and battery capacity. 500 data points represent all simulations (top); Pareto front approximation (bottom).

Multicriteria optimisation of hybrid fuel cell systems

The operation of fuel cell systems (FCS) depends on a number of influencing factors still beset by an incomplete understanding of their electrochemical and physical interactions. The resulting complexity of FCS limits the applicability and success of the technology. In order to exploit its potential, a toolchain has been developed at the ZSW in collaboration with the Munich University of Applied Sciences (HM) with a view to supporting system architects in the design and operation of such complex systems.

An FCS model was extended to map ageing effects at FC stack level and drive train components at system level by way of a proof of concept. The model covers fundamental interactions at drive train level and enables parameters to be set at the same time for the design and operational control of the system components. Highly efficient optimisation algorithms and statistical learning methods are used in view of the considerable computing time required for the repeated simulations (see figure above). This permits a structural evaluation of the technological potential in the form of conflicting target values and the effects of influencing factors. System architects can therefore directly and methodically capture the »best possible« solution for their complex problem in any given case, constituting significant added value in comparison to previous development methods (see figure below).

Abb. oben: Simulation eines WLTP-Zyklus Geschwindigkeitsprofils, resultierender Leistungsbedarf des Antriebsstrangs und Vergleich von BZ-Zellspannung u. Batterieladestatus verschiedener Betriebsstrategien.

Above: Simulation of a WLTP cycle speed profile, resulting power required by the drive train and comparison of fuel cell voltage and state of battery charge of different operating strategies.

Luis Winkler
luis.winkler@zsw-bw.de
+49 731 9530-826

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

PUBLIC RELATIONS



IMPRESSIONS

2024

> Einweihung Powder-Up mit der Bundesforschungsministerin Bettina Stark-Watzinger.

> Powder-Up opening with Federal Minister of Research Bettina Stark-Watzinger.



v Ministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut am ZSW-Stand auf der hy-fcell Messe in Stuttgart.

v Minister Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut at the ZSW stand at the hy-fcell trade fair in Stuttgart.



^ Remote und vor Ort am ZSW: Durch das Hybridkonzept nahmen am 3. PV-Recycling-Workshop TeilnehmerInnen aus neun Ländern teil.

^ Remote and in person at the ZSW: A hybrid concept enabled participants from nine countries to participate in the 3rd PV Recycling Workshop.

v Besuch der Ministerin für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Thekla Walker MdL, auf dem Windenergiefeld Geislingen/Donzdorf mit Präsentation des »BirdRecorders«.

v Visit to the Geislingen/Donzdorf wind energy test site by Baden-Württemberg Minister for the Environment, Climate and Energy, Thekla Walker MdL, with presentation of the »BirdRecorder«.



< Finanzminister Danyal Bayaz am ZSW in Ulm mit dem ZSW-Vorstand.

< Finance Minister Danyal Bayaz at the ZSW site in Ulm with the ZSW Board of Directors.



^ Besuch einer Andalusischen Delegation mit dem Minister für Industrie und Energie der Autonomen Gemeinschaft Andalusien, Jorge Paradelo Gutiérrez, am ZSW in Stuttgart.

^ Visit of an Andalusian delegation with the Minister for Industry and Energy of the Autonomous Community of Andalusia, Jorge Paradelo Gutiérrez, to the ZSW in Stuttgart.



> Staatssekretärin Elke Zimmer, Mitglied des Landtages, und Dr. Alexander Kabza, Leiter des Brennstoffzellentestfeldes in HyFaB.

> State Secretary Elke Zimmer, Member of the State Parliament and Dr. Alexander Kabza, Head of the HyFaB fuel cell test field.



∨ Die Generalkonsulin der Republik Türkei, Makbule Koçak, besucht das ZSW in Stuttgart.

∨ The Consul General of the Republic of Turkey, Makbule Koçak, visits the ZSW in Stuttgart.



∨ Offizielle Eröffnung der Naturschutzforschung am Windenergetestfeld Geislingen/Donzdorf.

∨ Official opening of nature conservation research at the Geislingen/Donzdorf wind energy test field.



^ Vier Mal gut besucht: Zum ersten Mal veranstaltet das ZSW eigene Parallelveranstaltungen im Ausstellungsbereich der EU PVSEC und der Intersolar.

^ Four well-attended talks: The ZSW organised its own parallel events in the exhibition area at EU PVSEC and Intersolar.

> KEA-BW und ZSW organisierten das »Energiepolitische Forum« in Stuttgart.

> KEA-BW and the ZSW organised the »Energiepolitische Forum« in Stuttgart.



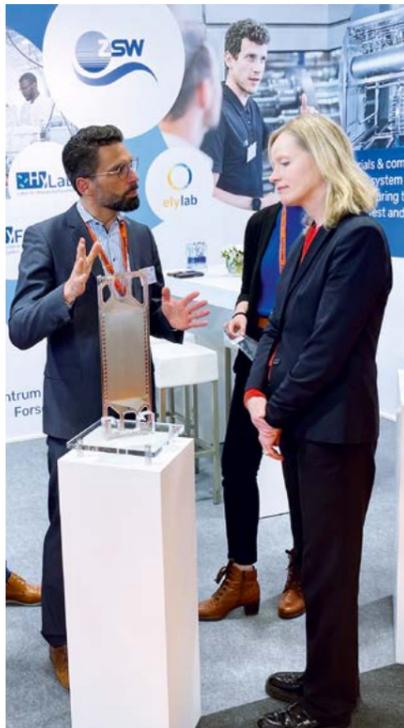
^ Dr. Franziska Brantner, Parl. Staatssekretärin im Wirtschaftsministerium und Bundesvorsitzende von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, und Frank Häußler, Projektleiter in HyFaB.

^ Dr. Franziska Brantner, Parliamentary State Secretary (Ministry of Economic Affairs) and Federal Chairman of BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, and Frank Häußler, project manager at HyFaB.



< MINT-Studentinnen der Frühjahrsuniversität »Meccanica Feminale« begeistern sich für die Schlüsseltechnologien des ZSW in Stuttgart.

< STEM students at the spring university »Meccanica Feminale« show their enthusiasm for the key technologies of the ZSW in Stuttgart.



< Besuch der Umweltministerin Tekla Walker auf der Hannover Messe.

< Visit by Environment Minister Tekla Walker at the Hannover Messe.

^ Der 3. Perowskit-Workshop BW am KIT: Das ZSW war im wissenschaftlichen Komitee vertreten und knüpfte wichtige Kontakte zu Forschung und Industrie.

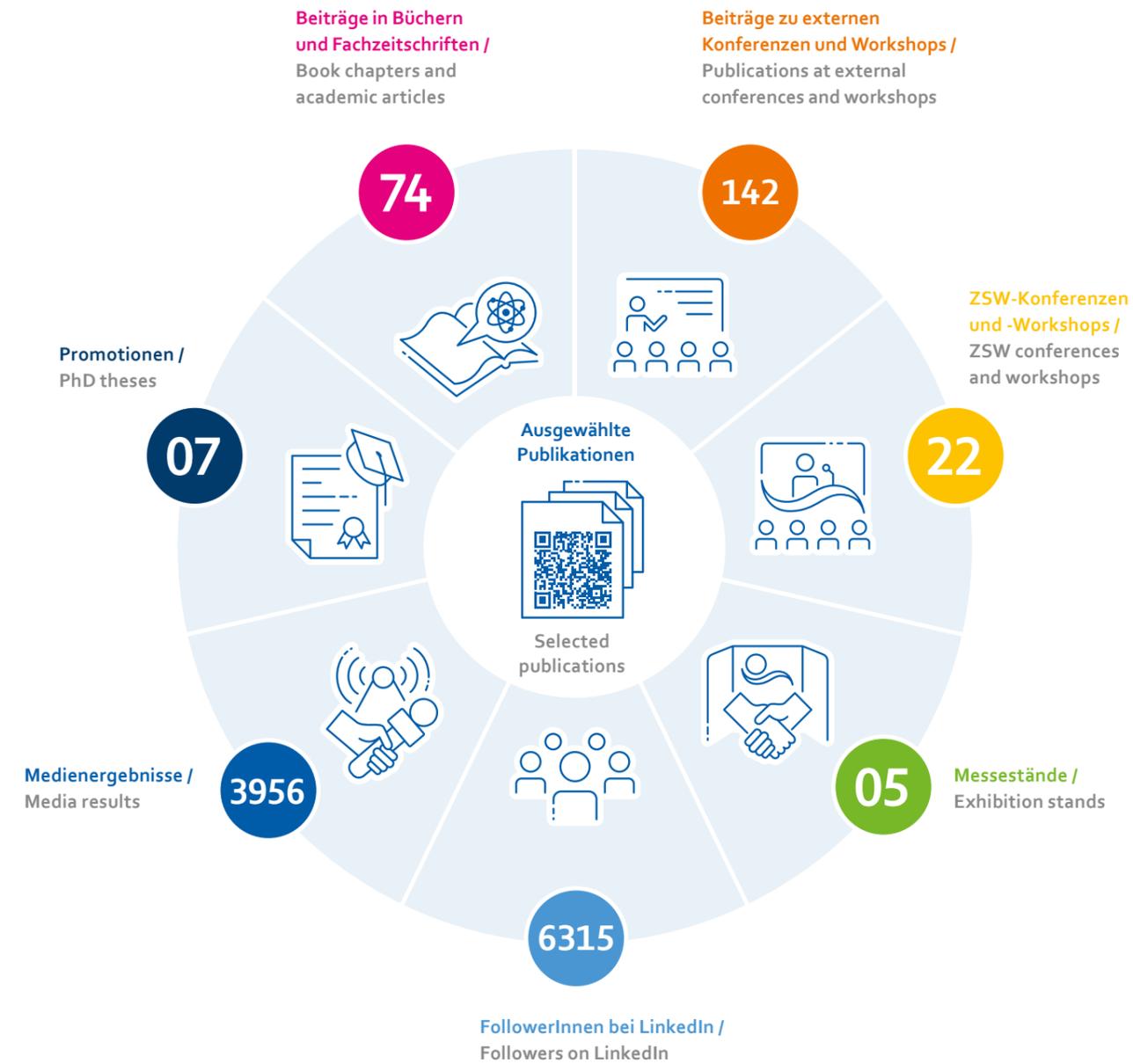
^ The 3rd BW Perovskite Workshop at KIT: ZSW was represented on the scientific committee and established important contacts with research and industry.



< Verabschiedung des ZSW-Kuratoriums-vorsitzenden Prof. Dr. Christian Mohrdieck (2.v.r.) durch den ZSW-Vorstand und das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.

< Farewell to the Chairman of the ZSW Board of Trustees Prof. Dr. Christian Mohrdieck (2nd from right) by the ZSW Board of Directors and the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs.

Sichtbarkeit Visibility



Mitgliedschaften Memberships

- AGEB Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
- AKK Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
- Allianz BIPV Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V.
- BVES Bundesverband Energiespeicher Systeme e. V.
- Cluster BZ BW Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg
- Cluster Elektro Cluster Elektromobilität Süd-West
- CPN Clean Power Net
- DFBEW Deutsch-französisches Büro für die Energiewende
- DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
- DIN DIN-Arbeitsausschuss Wasserstofftechnologien
- DPP Deutsche Phosphor-Plattform e. V.
- DWV Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-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 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.
- OpenEMS OpenEMS Association e. V.
- PEE 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.
- SolarCluster 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 Windenergie Forschungscluster

DOKUMENTATION

DOCUMENTATION



Finanzbericht

Financial Information

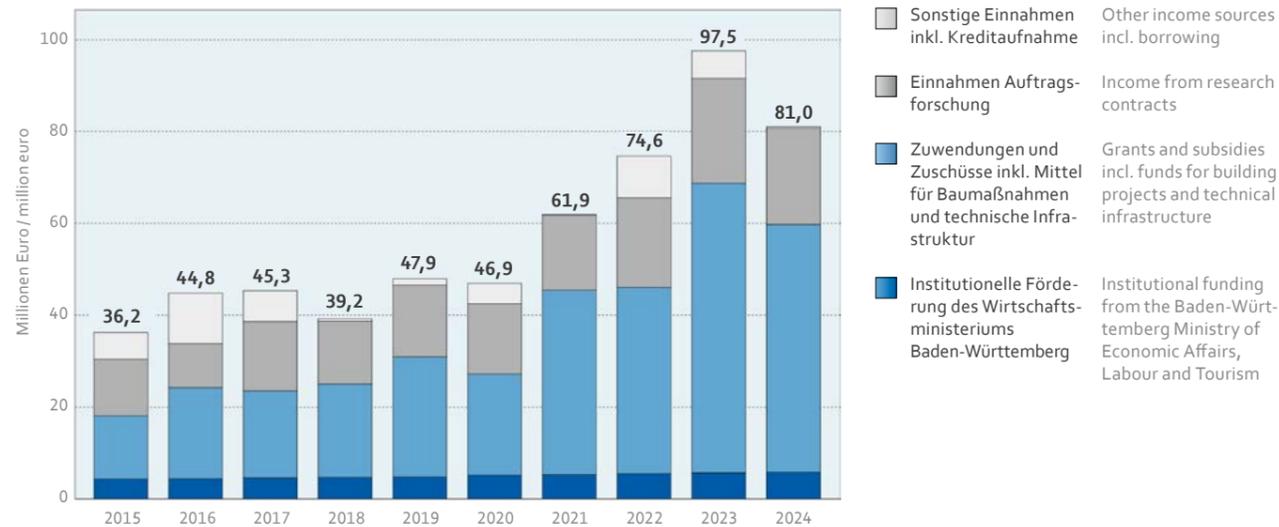
Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 81,0 Mio. Euro und damit unter dem Niveau von 2023, weil im Vorjahr überdurchschnittlich hohe Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen in den Themenfeldern Brennstoffzellen und Batterien zugegangen sind.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2024 um 0,1 Mio. auf 5,8 Mio. Euro.

The revenue from ordinary business activities in the past year amounted to 81.0 million euro, lower than in 2023 due to above-average investment funding for the fuel cell and battery departments in the year before.

The proportion of institutional funding from the state of Baden-Württemberg increased by 0.1 million euro to 5.8 million euro in 2024.

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, seinen Arbeitsbedingungen, dem kollegialen Betriebsklima sowie den vielfältigen Entwicklungsperspektiven für seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ein attraktiver Arbeitgeber. Die Mitarbeiterkapazität hat sich im Jahr 2024 gegenüber dem Vorjahr von 310 Vollzeitstellen auf 322 erhöht. Das entspricht einer Beschäftigtenzahl von 357. Mit einem Anteil von 86 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität liegt die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau. Das ZSW ist auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland attraktiv. So haben gut 13 % aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft. Die Kolleginnen und Kollegen kommen aus 24 verschiedenen Ländern. Der Frauenanteil lag 2024 insgesamt bei 24 %. 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. Das ZSW bietet seinen Beschäftigten ein breites Spektrum an Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen. Es umfasst fachspezifische und fachübergreifende Inhalte ebenso wie Angebote zur Persönlichkeitsentwicklung und Schulungen für Führungskräfte. Darüber hinaus stehen im Rahmen des beruflichen Gesundheitsmanagements Veranstaltungen zum Thema Bewegung, Stressprävention und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm. 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 2024 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 105 Studierende sowie Praktikantinnen und Praktikanten am ZSW tätig. Im Berichtsjahr fertigten 33 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 increased in 2024, rising to 322 from 310 in the previous year. The number of people employed is 357. With research and scientific staff accounting for 86% of the total, productivity remains steady and at a high level.

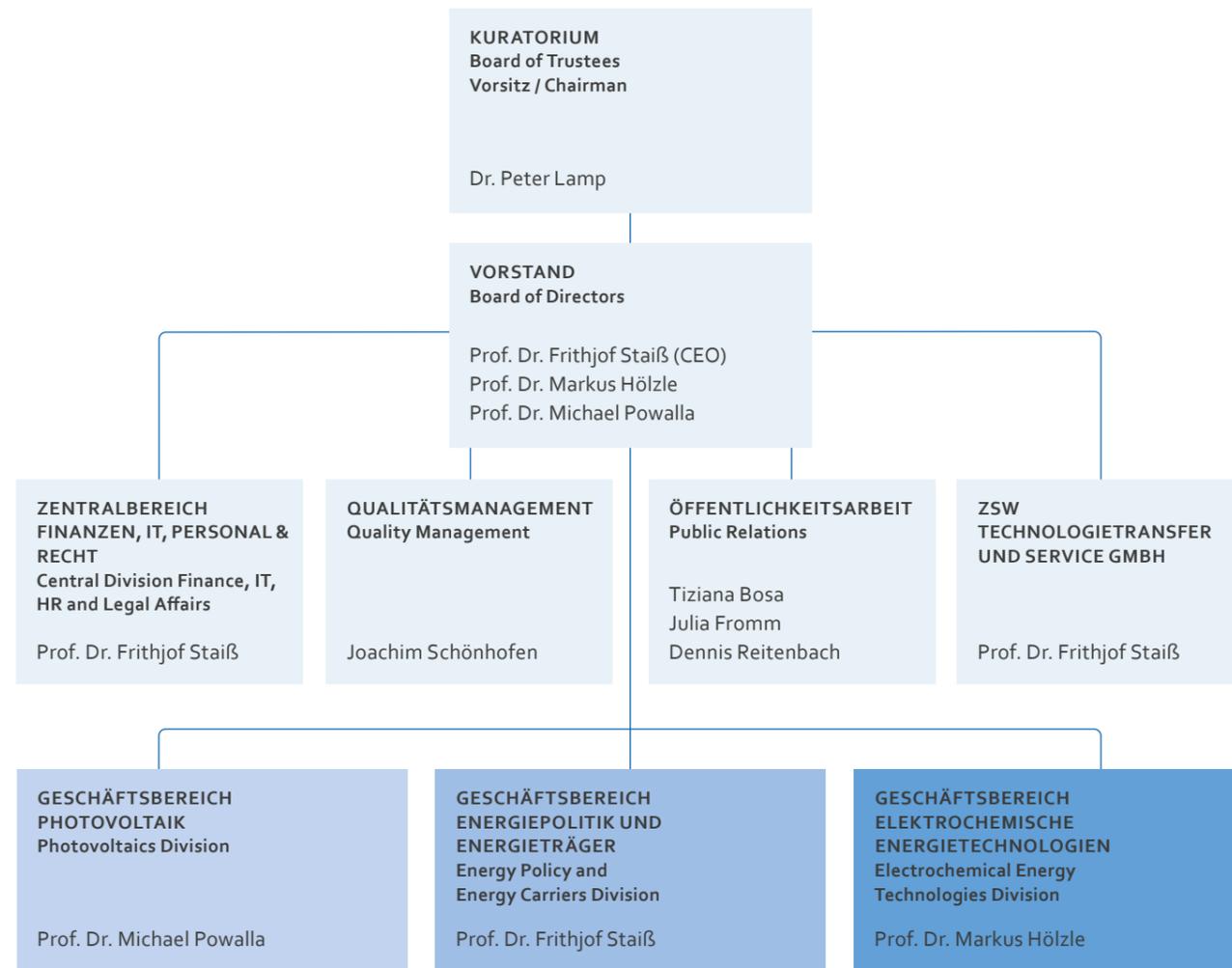
The ZSW also attracts academics from abroad. About 13% of the employees have foreign citizenship, with 24 different nationalities represented in the workforce. In 2024, women accounted for 24% of ZSW employees. The ZSW is keen to increase this percentage – which is typical for research institutes with 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. The ZSW offers its employees a wide range of training and professional development opportunities. The topics vary, covering subject knowledge, broader research-related issues, personal development and training for managers. There is also an occupational health management scheme in place with a programme of events covering the subjects of exercise, stress prevention and ergonomics in the workplace. Networking is a high priority for the ZSW, which has links with universities and assists with academic training in the form of lectures, seminars and internships, and through supervision of research papers and dissertations. There were 105 students and interns working at the ZSW in 2024 in addition to the staff employed under the salary scheme for state employees (Tarifvertrag der Länder – TV-L). In the year under review, 33 doctoral candidates completed their dissertations at the ZSW.

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



Organisationsstruktur

Organisational Structure



Weitere Organigramme auf unserer Website:



Further organisation charts on our website:

Standorte

Locations



PRESSEKONTAKTE STUTTGART / CONTACT

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

Dennis Reitenbach
+49 711 7870-393
dennis.reitenbach@zsw-bw.de

PRESSEKONTAKT ULM / CONTACT

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

Bildnachweis

Image credits

Umschlag außen:
Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG

Umschlag innen:
SÜDWEST PRESSE, Marc Hörger

David Arzt: Seiten 6/7, 12 (oben), 34/35 (oben),
54 (oben), 91 (oben rechts), 84/85

Martin Duckek: Seiten 10/11, 13 (unten), 16/17,
20, 21 (oben), 22/23 (unten), 25 (unten), 27, 28,
30/31, 32 (mittig und unten), 33, 36/37 (mittig),
57, 61, 62, 71 (oben), 76/77, 78 (oben), 84/85

Elvira Eberhardt (Universität Ulm):
Seiten 25 (oben), 32 (oben)

Firma Ecoclean: Seite 12

Firma Optima: Seiten 28/29

Alexander Fischer: Seiten 4, 46

Fotografie Patrick Zanker: Seiten 8/9, 50 (oben)

FVV/Dirk Lässig: Seiten 21 (unten), 24, 28/39

Heiko Grandel (Universität Ulm): Seiten 18/19

H2FLY GmbH: Seite 37

Südwestpresse/Marc Hörger: Seiten 22/23 (oben)

Laila Tkotz/KIT: Seite 80

ZwickRoell GmbH & Co. KG: Seiten 24, 36

Fotos ohne Angabe: ZSW.

Impressum

Imprint

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

REDAKTION / EDITORIAL TEAM
Julia Fromm
(verantwortlich / chief editor)
Tiziana Bosa
Patricia Harprecht
Dennis Reitenbach

ÜBERSETZUNGEN / TRANSLATION
Elisabeth Noske
Gillian Christine Gingell

LEKTORAT / EDITORIAL OFFICE
Baker & Company,
Fachübersetzungen und Lektorat

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

DRUCK / PRINT
printmedia solutions GmbH
Weinheimer Straße 62
68309 Mannheim

Der Jahresbericht wurde klimaneutral mit Cradle to
Cradle-, Blauer Engel- und FSC-Zertifizierung sowie
mit Farben auf Pflanzenölbasis nach DIN ISO 12647-2
gedruckt.

The Annual Report complies with the requirements for
Cradle to Cradle, Blue Angel and FSC certification and
has been printed with vegetable oil-based inks in
accordance with the environmental standards set out
in DIN ISO 12647-2.



Kontakt / Contact



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

ZSW Stuttgart
Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
+49 711 7870-0

**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

ZSW Ulm
Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
+49 731 9530-0

ELAB / HYFAB / Powder-Up!
Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
+49 731 9530-500



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