

// Jahresbericht
Annual Report

2022

ZSW

// Copyright

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

// Copyright

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

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / Our Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	Erfolge 2022 / 2022 Success Stories
14	Schwerpunktbericht / Focus Report Circular Economy: reduce, repair, rethink, reinvent, recycle
34	Fachgebiete und Forschungsprojekte / Departments and Research Projects
36	Systemanalyse / Systems Analysis
40	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
44	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
48	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
52	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
56	Produktionsforschung / Production Research
60	Akkumulatoren / Accumulators
62	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
66	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
70	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
74	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
84	Dokumentation / Documentation
86	Finanzbericht / Financial Information
88	Personalentwicklung / People Development
90	Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
92	Organisationsstruktur / Organisational Structure
97	Bildlegenden / Captions
98	Standorte / Locations
100	Abkürzungen / Abbreviations
101	Impressum / Imprint

// Vorwort

Die Entwicklungen im Jahr 2022 zeigen sehr nachdrücklich die herausragende Bedeutung von Klimaschutz, Energiesicherheit und resilienten Liefer- und Wertschöpfungsketten für eine Zukunft in Frieden und Wohlstand. Damit sind die Themen, für die das ZSW seit vielen Jahren steht, wichtiger denn je.

Der diesjährige Schwerpunktbericht befasst sich mit der Circular Economy, die letztlich für den Erfolg der Energiewende von substanzieller Bedeutung ist. Das ZSW setzt bei seinen Technologien am Rohstoffeinsatz und den Produktionsverfahren an. Im Bereich Photovoltaik wird auch an Lösungen gearbeitet, um defekte Module zu reparieren. Damit das Ende einer Produktnutzung nicht auch das Ende der Rohstoffnutzung ist, werden mit neuen Recyclingverfahren ausrangierte Batterieelektroden aus Elektrofahrzeugen umweltschonend und mit so hoher Qualität reaktiviert, dass sie direkt wieder in neuen Batteriezellen eingesetzt werden können.

Das Interesse der Öffentlichkeit 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 und den Vorsitzenden Professor Christian Mohrdieck. Für die finanzielle Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit danken wir dem Land Baden-Württemberg sowie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

Allen Leserinnen und Lesern des ZSW-Jahresberichts wünschen wir eine interessante Lektüre!

// Foreword

The developments in 2022 have really emphasised the great importance of climate action, energy security, resilient supply networks and strong value-added chains for future peace and prosperity. This means that the issues central to the work of the ZSW are more important than ever.

This year's focus report is about the circular economy, which is ultimately fundamental to the success of the energy transition. The ZSW is mindful of the use of raw materials and the production processes in its technologies. Work is also being done in the field of photovoltaics to come up with solutions for the repair of defective modules. Battery electrodes which have been removed from electric vehicles and discarded are being reconditioned in new recycling processes in a bid to conserve resources and salvage raw materials from products which have reached the end of their service life. The end result is of such high quality that they can be used again straight away in new battery cells.

Our research work is of great interest to the public. 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. Thanks are also due to the state of Baden-Württemberg and to our partners from enterprise, public research funding and science for the financial support and excellent cooperation.

We hope you enjoy reading the ZSW Annual Report!



R. Sjö U. Poivalla

// Der Vorstand des ZSW

// ZSW Board of Directors



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Michael Powalla

// Prof. Dr. Markus Hölzle

// 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 die Politik und Gesellschaft mit Systemanalysen und Empfehlungen für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende.

// Wissenschaft mit klarem Fokus

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

// Technologietransfer schafft Arbeitsplätze

Als industrieorientiertes Forschungsinstitut ebnen wir neuen Technologien den Weg in den Markt. Von der Materialforschung über die Entwicklung von Prototypen und Produktionsverfahren bis hin zu Anwendungssystemen, Qualitätstests und Marktanaly-

sen decken wir die gesamte Wertschöpfungskette ab. Diese Expertise aus einer Hand ist für unsere Partner aus der Wirtschaft ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

// 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 stimmen. Dazu trägt auch unser zertifiziertes Qualitätsmanagement bei.

// Motiviert im Team

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

// Dem Ganzen verpflichtet

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

// Akteure neutral informieren

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

// 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 energies and increased energy efficiency and the idea of circular economy. The 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 also work on technical and economic concepts for their integration into energy systems. Prototypes and good designs will become products in the process of transferring the know-how to industry. We are also active in the political world and in the social arena in 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 respective fields, allowing us to compete at international level and achieve success in developing a range of key technologies and rolling them out in the marketplace. Linking the disciplines of science, engineering and economics is central to the 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 major key to success for our partners in the business

world.

// 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 adherence to budget stipulations and 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

The managers and employees at the ZSW 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. This is why we seek transparency and neutrality in the way in which we deliver information to the industrial, political and social arenas. 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.

// Stiftung

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.“

Stifter des ZSW / ZSW founders

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

- > Land Baden-Württemberg
- > Universität Stuttgart
- > Universität Ulm
- > Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

// Foundation

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 energies, 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.”

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 Verband der Elektrizitätswerke Baden-Württemberg e. V.)

// Mitglieder des Kuratoriums

// Members of the Board of Trustees

Vorsitzender / Chairman

- > Prof. Dr. Christian Mohrdieck

Stellvertreter / Vice Chairmen

- > Prof. Dr. Uli Lemmer
- > Prof. Dr.-Ing. Michael Weber

Ministerien und Organisationen / Ministries and Organisations

- > Ministerialdirigent Ulrich Benterbusch, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Ministerialdirigent Engelbert Beyer, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- > Dr.-Ing. Klaus Bonhoff, Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- > Ministerialdirigent Martin Eggstein, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- > Dr.-Ing. Ronny Feuer, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus (bis 30.9.2022), Ministerialdirektor Michael Kleiner (ab 1.10.2022), Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg

Universitäten / Universities

- > Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel, Rektor der Universität Stuttgart
- > Prof. Dr.-Ing. Michael Weber, Präsident der Universität Ulm

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / German Aerospace Center

- > Dipl.-Ing. Bernhard Milow, Innovation, Transfer und wissenschaftliche Infrastruktur

Fraunhofer-Gesellschaft

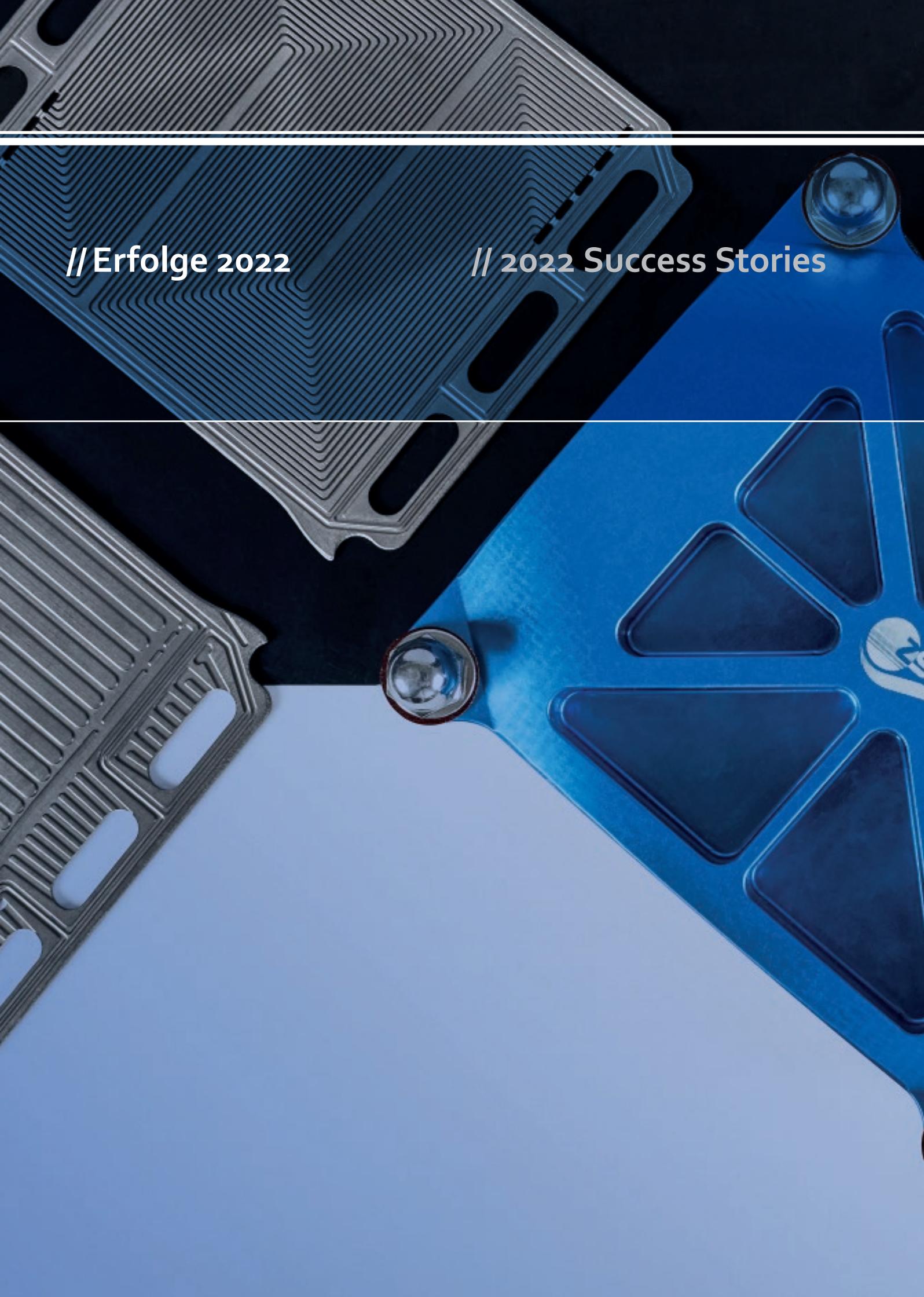
- > Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Wissenschaft / Science

- > Prof. Dr. Michael Auer, Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung
- > Dr. Marion Dreyer, DIALOGIK Gemeinnützige GmbH
- > Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- > Prof. Dr. Angelika Heinzl
- > Prof. Dr. Jürgen Janek, Justus-Liebig-Universität Gießen
- > Prof. Dr. Uli Lemmer, Karlsruher Institut für Technologie
- > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

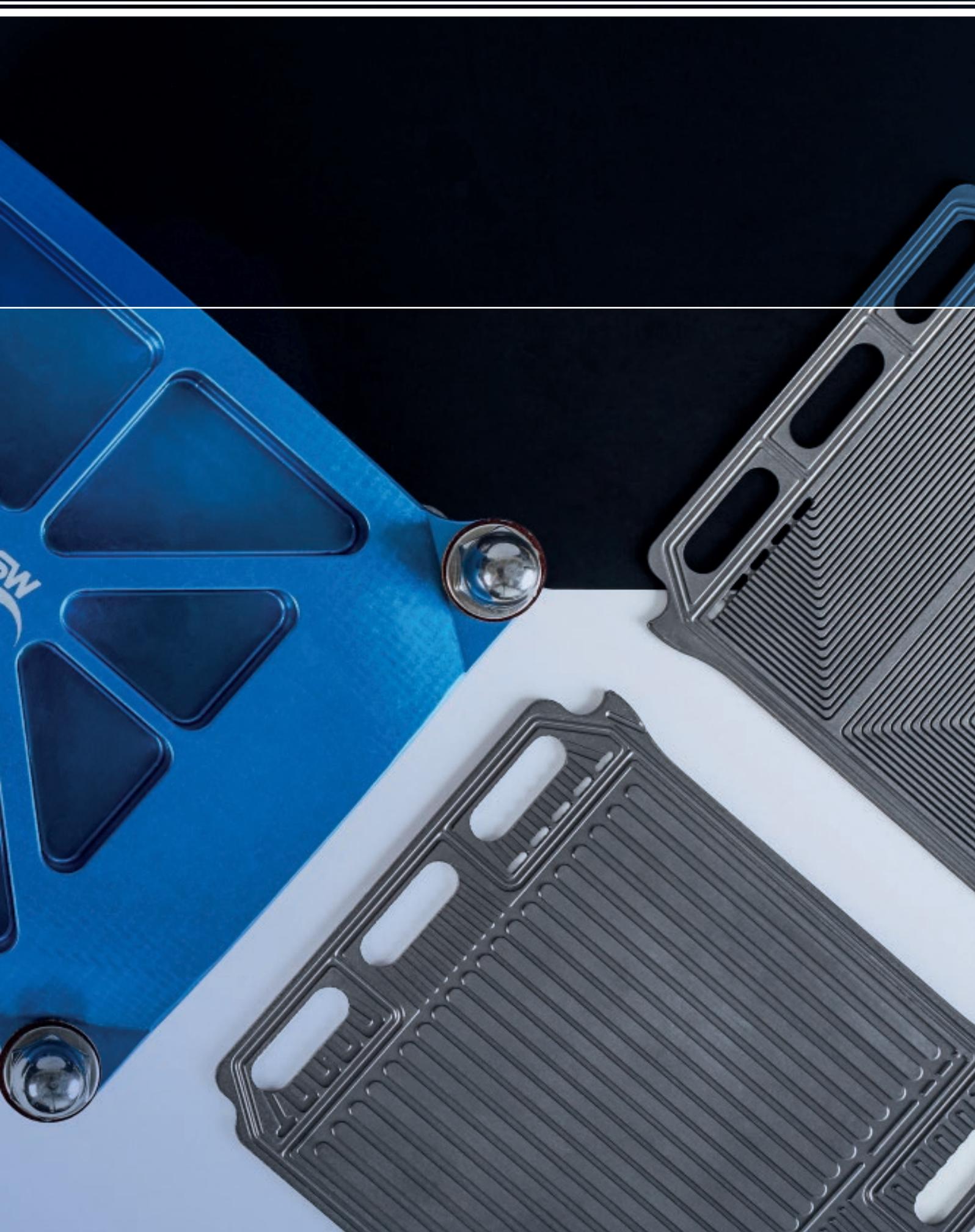
Wirtschaft / Commercial enterprises

- > Dipl.-Ing. (FH), MBA Klaus Eder, Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm GmbH
- > Dr.-Ing. Christoph Erdmann, MESSER GROUP GmbH
- > Rainer Hald, VARTA AG
- > Dr. Peter Lamp, BMW Group
- > Dieter Manz, Manz GmbH Management Consulting and Investment
- > Prof. Dr. Christian Mohrdieck, cellcentric GmbH & Co. KG
- > Prof. Dr. Wolfram Münch, EnBW AG
- > Dipl.-Ing. Roland Pröger, Fichtner GmbH & Co. KG
- > Dr. Oliver Schauerte, Volkswagen AG
- > Dr. Gernot Stellberger, EKPO Fuel Cell Technologies GmbH



// Erfolge 2022

// 2022 Success Stories



// Erfolge 2022

Wo etwas Neues entstehen soll, hat wissenschaftliches Arbeiten erst seinen Daseinszweck. Nicht immer ist der Weg zu neuen Erkenntnissen gradlinig. Meist tasten sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler langsam an eine Erkenntnis heran. Umso größer ist die Freude, wenn sie angekommen sind und ihre Erfolge von Politik und Öffentlichkeit gewürdigt werden. In allen Forschungsbereichen gab es im Jahr 2022 am ZSW Erfolge zu feiern. Wir stellen hier einige exemplarisch vor.

// FEIERLICHER SPATENSTICH FÜR DEN ZWEITEN BAUABSCHNITT VON HYFAB

Im Februar 2021 begannen am ZSW in Ulm die Bauarbeiten für die Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen (HyFaB). Nach nur 15 Monaten war das europaweit größte unabhängige Testfeld für Brennstoffzellenstacks bis 250 Kilowatt bezugsfähig. Das Umweltministerium und das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg unterstützen den Bau mit 10,5 Millionen Euro. Am 23. Februar 2022 begann der zweite Bauabschnitt: ein weiteres Gebäude mit rund 3.000 Quadratmetern für eine Modellfabrik zur Montage von Brennstoffzellenstacks, bestehend aus Produktionshalle sowie Seminar- und Büroräumen. Die Inbetriebnahme der Anlagen zur Entwicklung von Stackkomponenten und Fertigungsprozessen soll im dritten Quartal 2023 erfolgen. Beim Spatenstich mit Prominenz aus Politik und Industrie übergab Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut für diesen Gebäudeabschnitt (HyFaB-2) einen Förderbescheid über 7,75 Millionen Euro aus europäischen Fördermitteln des COVID-19 Recovery Fund (REACT-EU).

// HyFaB-2-Spatenstich mit zwei Ministerinnen (v. l.): Frithjof Staiß, Thekla Walker, Markus Hölzle, Nicole Hoffmeister-Kraut, Gunter Czisch.
// HyFaB-2 groundbreaking ceremony with two government ministers (left to right): Frithjof Staiß, Thekla Walker, Markus Hölzle, Nicole Hoffmeister-Kraut, Gunter Czisch.



// 2022 Success Stories

The reason for the existence of scientific work is found wherever there is intent to enter new and uncharted territory. The pathway to new insights is not always straight. Research scientists usually take the slow road to any realisation. All the greater the joy when they have arrived and their achievements are recognised in political and public life. There were success stories to celebrate in all fields of research at the ZSW in 2022. We have chosen just a few examples to highlight here.

// GROUNDBREAKING CEREMONY FOR THE SECOND CONSTRUCTION PHASE OF HYFAB

Construction work for the research factory for hydrogen and fuel cells (HyFaB) began at the ZSW in Ulm in February 2021. The largest independent test site in Europe for fuel cell stacks of up to 250 kilowatts was ready for occupancy after just 15 months. The Baden-Württemberg Ministry of the Environment and Ministry of Economic Affairs are funding the build to the tune of 10.5 million euro. The second construction phase got under way on 23 February 2022 on another building of around 3,000 square metres earmarked for a model factory for the assembly of fuel cell stacks, consisting of production facility, seminar rooms and offices. The systems for the development of stack components and manufacturing processes are scheduled to go into operation in the third quarter of 2023. Prominent figures from politics and industry attended the groundbreaking ceremony where the Minister of Economic Affairs Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut presented a grant notification letter confirming funding of 7.75 million euro for this building section (HyFaB-2) from the European COVID-19 Recovery Fund (REACT-EU).

// HyFaB im Oktober 2022, v. l.: Seminartrakt, Modellfabrik, Bürogebäude, Brennstoffzellentesthalle und Gaselager.
// HyFaB in October 2022 (left to right): seminar wing, model factory, office building, fuel cell test centre and gas storage facility.





// ELEKTROLYSE „MADE IN BW“ IN BETRIEB GENOMMEN

Die baden-württembergische Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut hat im Sommer eine Elektrolyse-Pilotanlage am ZSW gestartet. Bei dem Systemdemonstrator handelt es sich um eine vom ZSW entwickelte alkalische Druckelektrolyse (30 Bar) mit einer elektrischen Anschlussleistung von einem Megawatt und einer Produktionskapazität von etwa 20 Kilogramm Wasserstoff pro Stunde. Mit der Inbetriebnahme des Elektrolyseurs „made in Baden-Württemberg“ wurde Pionierarbeit für die Zukunft der Wasserstofftechnologie im Land geleistet. In die Anlage haben über 40 Unternehmen aus Baden-Württemberg Komponenten, Technologien und Know-how eingebracht. Das Wirtschaftsministerium fördert das vom ZSW koordinierte Projekt mit insgesamt 5 Millionen Euro. Für Baden-Württemberg eröffnen sich damit Chancen auf First-mover-Vorteile im internationalen Wasserstoffwettbewerb.

// KI FÜR ENERGIEEFFIZIENZ

Wie kann künstliche Intelligenz (KI) Unternehmen helfen, Energie und Ressourcen zu sparen? Diese Frage diskutierten über 30 Interessierte aus der Industrie bei der Veranstaltung „SustAInable“. In Vorträgen und interaktiven Praxisbeispielen zeigten KI-Fachleute am ZSW, welche Chancen KI und Digitalisierung für Energiewende und Energieeffizienz sowie Nachhaltigkeit bieten. KI als Zukunftstechnologie branchenübergreifend und landesweit auszurollen, ist das Anliegen des baden-württembergischen Projekts „KI-Lab“. Das vom ZSW koordinierte KI-Lab.EE will Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der erneuerbaren Energien, Batterien, Brennstoffzellen und e-Fuels den kostenfreien Einstieg in die KI ermöglichen. So können sie Potenziale zur Energieeffizienzsteigerung, Ressourcenschonung, Kostenreduktion und Prozessoptimierung ausschöpfen und ihre Wettbewerbsfähigkeit dauerhaft steigern.

// ELECTROLYSIS “MADE IN BW” PUT INTO OPERATION

The Baden-Württemberg Minister of Economic Affairs Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut activated an electrolysis pilot plant at the ZSW in the summer. The demonstration system is an alkaline high-pressure electrolysis unit (30 bar) developed by the ZSW with an electric power rating of one megawatt and a production capacity of around 20 kilograms of hydrogen per hour. The launch of the “Made in Baden-Württemberg” electrolyser is indicative of the pioneering spirit in the federal state and its willingness to invest in the future of hydrogen technology. More than 40 enterprises from Baden-Württemberg have been instrumental in the system, contributing components, technological input and know-how. The Ministry of Economic Affairs is backing the project, which is being coordinated by the ZSW, and is investing a total of five million euro. This is opening up the opportunity for Baden-Württemberg to benefit from first-mover advantages over international competitors in the hydrogen industry.

// AI FOR ENERGY EFFICIENCY

How can artificial intelligence (AI) help companies to save energy and resources? This question was posed at the “SustAInable” event, with over 30 people engaging with interest in the discussion. AI experts delivered lectures at the ZSW and ran interactive sessions in which they took practical examples to demonstrate the opportunities offered by AI and digitisation for the energy transition, energy efficiency and sustainability. The aim of the Baden-Württemberg project “AI Lab” is to roll out AI as a technology of the future across sectors and statewide. The KI-Lab.EE project, coordinated by the ZSW, wants to be a free introduction to AI for enterprises along the entire value chain in renewable energies, batteries, fuel cells and e-fuels. By facilitating their entry in this way, they will be able to exploit the potential to boost energy efficiency, conserve resources, reduce costs and optimise processes – and permanently increase their competitiveness.



// Wie Unternehmen ihr Potenzial mit KI-Lösungen ausschöpfen können, zeigten die KI-Expertinnen und -Experten am ZSW in der Veranstaltung „SustAInable“ auf.

// The AI experts at the ZSW demonstrated how companies can exploit their potential with AI solutions at the „SustAInable“ event.



// PV-Fassade an einer Halle aus Betonsandwichelementen am Beispiel der neuen HyFaB-Laborhalle des ZSW in Ulm.

// PV frontage on concrete sandwich panels demonstrated on the new HyFaB laboratory building at the ZSW in Ulm.

// BAUWERKINTEGRIERTE PHOTOVOLTAIK (BIPV)

Die vom Umweltministerium Baden-Württemberg ins Leben gerufene BIPV-Initiative Baden-Württemberg mit einem Kernteam aus der Architektenkammer Baden-Württemberg, dem Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen der Hochschule Konstanz, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) sowie dem ZSW hat mittlerweile 44 Bauprojekte begleitet, darunter verschiedene Hochschulgebäude, Hotels und Industriebauten. Neben der direkten Begleitung konkreter Projekte wurde Schulungsmaterial entwickelt. Dieses betrifft unter anderem die Anforderungen an die Architektur und Gestaltung von Fassaden sowie Einflussfaktoren für die Rentabilität. Mit dem Material wurden Workshops und Schulungen durchgeführt. Ein Online-Leitfaden zum Thema BIPV für Bauunternehmen, Architektur- und Planungsbüros wurde im Juni veröffentlicht und bei einer Roadshow in den Städten Stuttgart, Konstanz, Freiburg und Karlsruhe mit insgesamt über 1.000 TeilnehmerInnen vorgestellt.

// TANDEM-SOLARMODUL MIT HOHEM WIRKUNGSGRAD

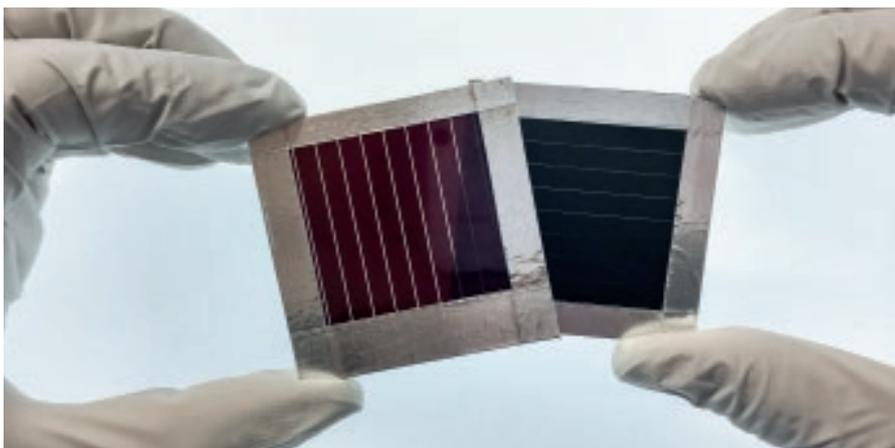
Dem ZSW ist es gelungen, ein Tandem-Solarmodul mit einem hohen Wirkungsgrad von 21,1 Prozent herzustellen. Das Modul besteht aus zwei übereinandergestapelten Teilmodulen, die unterschiedliche Bereiche des Sonnenspektrums nutzen. Das obere Solarmodul basiert auf der Perowskit-Technologie und nutzt den blauen Anteil des Sonnenlichts, während das darunterliegende CIGS-Modul den roten Spektralbereich nutzt. Insgesamt kann auf diese Weise das Sonnenspektrum effizienter genutzt und so das Wirkungsgradlimit eines Einzelmoduls überwunden werden. Das Modul hat eine Fläche von 9 cm² und zeichnet sich durch eine industrietaugliche und skalierbare Bauelementarchitektur aus. Bei kleineren Laborzellen erzielte das ZSW für diese Materialkombination bereits eine hervorragende Effizienz von 26,6 Prozent.

// BUILDING-INTEGRATED PHOTOVOLTAICS

The Baden-Württemberg BIPV initiative launched by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, Climate Protection and Energy Sector with a core team from the Baden-Württemberg Chamber of Architects, the Faculty of Energy Efficiency and Sustainable Building at the Konstanz University of Applied Sciences, the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) and from the ZSW has now overseen 44 construction projects, including various university buildings, hotels and industrial buildings. The input has taken the form of direct support for specific projects and the development of training resources. The subjects covered include the architectural specifications, the standards required of the exterior design, and factors which have an influence on viability. The resources have been used in workshops and training courses. An online guide on the subject of BIPV for construction companies, architectural firms and planning offices was published in June and presented at roadshows in the cities of Stuttgart, Konstanz, Freiburg and Karlsruhe attended by a total of over 1,000 people.

// TANDEM SOLAR CELL WITH HIGH LEVEL OF EFFICIENCY

The ZSW has succeeded in producing a tandem solar cell with a high level of efficiency of 21.1 per cent. The cell consists of two modules stacked on top of each other which use different ranges of the solar spectrum. The top solar module is based on perovskite technology and uses the blue light while the CIGS module below uses the red spectral region. The whole solar spectrum can be utilised more effectively in this way and the efficiency limit of a single module can be exceeded. The module has an area of 9 cm² and boasts industrial-grade architecture and scalable componentry. The ZSW has already achieved an excellent level of efficiency of 26.6 per cent with smaller laboratory cells in this material combination.



// Tandem-Solarmodul aus teiltransparentem Perowskit (links) und CIGS (rechts).

// Tandem solar module made of partially transparent perovskite (left) and CIGS (right).



// Ministerpräsident Winfried Kretschmann besichtigt neue Anlage zur Assemblierung von Pouch- und PHEV-2-Zellen.
 // Minister-President Winfried Kretschmann visiting new assembly line for pouch and PHEV2 cells.

// UPGRADE DER FORSCHUNGSPRODUKTIONSLINIE (FPL)

Der Hochlauf der Elektromobilität zeigt nicht nur die technische, ökonomische und ökologische Bedeutung von Lithium-Ionen-Batterien, sondern auch die Dynamik in diesem Markt: Alle zwei Jahre werden Batteriezellen verbessert. Der Fokus liegt darauf, die Batterieperformance zu steigern und die Herstellkosten zu senken. Hierfür müssen auch die Fertigungsanlagen ständig auf dem neuesten Stand gehalten werden. Das Projekt „ZellkoBatt“ setzt auf den schnellen Transfer innovativer Zellen in die industrielle Produktion. Hierfür baut das ZSW bis Mitte 2023 seine Anlagen zur Assemblierung von Pouch- und PHEV-2-Zellen bis 80 Amperestunden sowie für Rundzellen vom Typ 21700 aus. Zu dem Vorhaben gehört auch der Bau von zusätzlichen Test- und Formierkammern auf 53 Quadratmeter Fläche im Außenbereich. Das Bundesforschungsministerium fördert dies mit 13 Millionen Euro.

// POWDER-UP! PILOTANLAGE FÜR KATHODENMATERIALIEN

Mit einem feierlichen Spatenstich am 18. November startete das ZSW in Ulm die Bauarbeiten für ein vierstöckiges Gebäude (s. Abb. unten) mit rund 1.500 Quadratmeter Nutzfläche. In dem Bau wird eine Pilotanlage zur Herstellung von Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien errichtet: Powder-Up! In der Anlage können Batteriematerialien in Chargen bis zu 100 Kilogramm hergestellt werden. Diese Mengen sind die Voraussetzung, um große Batteriezellen für Elektroautos oder stationäre Speicher in Kleinserie herstellen zu können. Die Pilotanlage wird es zudem ermöglichen, in kurzer Zeit unterschiedliche Produktmuster herzustellen. Damit wird viel Entwicklungszeit eingespart. Das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg fördert den Bau mit 10 Millionen Euro. Für Projekte zur Produktionsforschung hat das ZSW vom Bundesministerium für Bildung und Forschung bereits eine Mittelzusage über 20 Millionen Euro erhalten.

// RESEARCH PRODUCTION LINE (FPL) UPGRADE

The speed of developments in the electromobility market is indicative not only of the technical, economic and ecological importance of lithium-ion batteries but also of the momentum in this industry, with battery cells being improved every two years. The focus is on increasing battery performance and reducing manufacturing costs. It is therefore imperative for production facilities to keep in step with the latest technology at all times. The “ZellkoBatt” project is concerned with the rapid transfer of innovative cells to industrial production. The ZSW will therefore be expanding its facilities for the assembly of pouch and PHEV2 cells of up to 80 ampere-hours and for 21700 round cells by the middle of 2023. The project also includes the construction of additional testing and forming chambers on an outdoor area of 53 square metres. The Federal Ministry of Education and Research has allocated 13 million euro in funding to the project.

// POWDER-UP! PILOT PLANT FOR CATHODE MATERIALS

A groundbreaking ceremony on 18 November marked the start of construction work on a four-storey building at the ZSW in Ulm with an area of around 1,500 square metres (see Fig. below). The facility will include a pilot plant for the production of cathode materials for lithium-ion batteries: Powder-Up! pilot plant for the production of cathode materials for lithium-ion batteries. It will be possible to produce battery materials in batches of up to 100 kilogrammes in the facility. Quantities of this magnitude are required in order to be able to produce large battery cells for electric cars or stationary storage facilities in small batches. The pilot plant will also make it possible to produce different product samples in a short time. This will save a great deal of development time. The Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs is funding the build to the tune of 10 million euro. The ZSW has already been promised funding of 20 million euro for production research projects by the Federal Ministry of Education and Research.



// Foto vom 3.2.2023.
 // Photo from 03.02.2023

// Schwerpunktbericht

// Focus Report



// Circular Economy: reduce, repair, rethink, reinvent, recycle



Der ungebremste Ressourcenverbrauch ist Hauptverursacher des globalen Klimawandels. Gleichzeitig nimmt die Konkurrenz um knappe Rohstoffe zu. Circular Economy will einen Beitrag dazu leisten, eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Wirtschaft zu schaffen. Das Konzept der Circular Economy geht weg vom derzeit noch weltweit vorherrschenden linearen Wirtschaftsmodell „Produzieren – nutzen – wegwerfen“ hin zu geschlossenen Kreisläufen im Einklang mit der Regenerationsfähigkeit von Ökosystemen. Dafür sind jedoch gravierende Änderungen der Produktions- und Verbrauchsmuster in der gesamten Wertschöpfung und Nutzung notwendig.

Das Denken, Handeln und Wirtschaften in Kreisläufen ist auch ein zentrales Element des europäischen Green Deals. Im März 2020 hat die Europäische Union einen wichtigen Impuls gegeben: Sie veröffentlichte einen neuen Aktionsplan für zirkuläres Wirtschaften, der letztlich auch entscheidend dazu beitragen soll, die Klimaneutralität bis spätestens 2050 zu erreichen. Es gibt nur eine Erde.

The unabated consumption of resources is the main cause of global climate change. There is, at the same time, increasing conflict as people compete for scarce raw materials. The circular economy is intended to contribute to the establishment of a sustainable and competitive economic system. The idea behind the circular economy is to abandon the linear “take-make-use-dispose” model, which is still prevalent all over the world, and to move towards closed loops which chime with the regenerative capacity of ecosystems. This requires major changes in production and consumption patterns, however, in all the value added and usage processes.

A circular flow of thinking, acting and doing business is also central to the European Green Deal. The European Union led the way in March 2020 when it published a new action plan for a circular economy with a view to making a decisive contribution to achieving climate neutrality by 2050 at the latest. There is only one planet Earth but, unless countermeasures are taken, the global



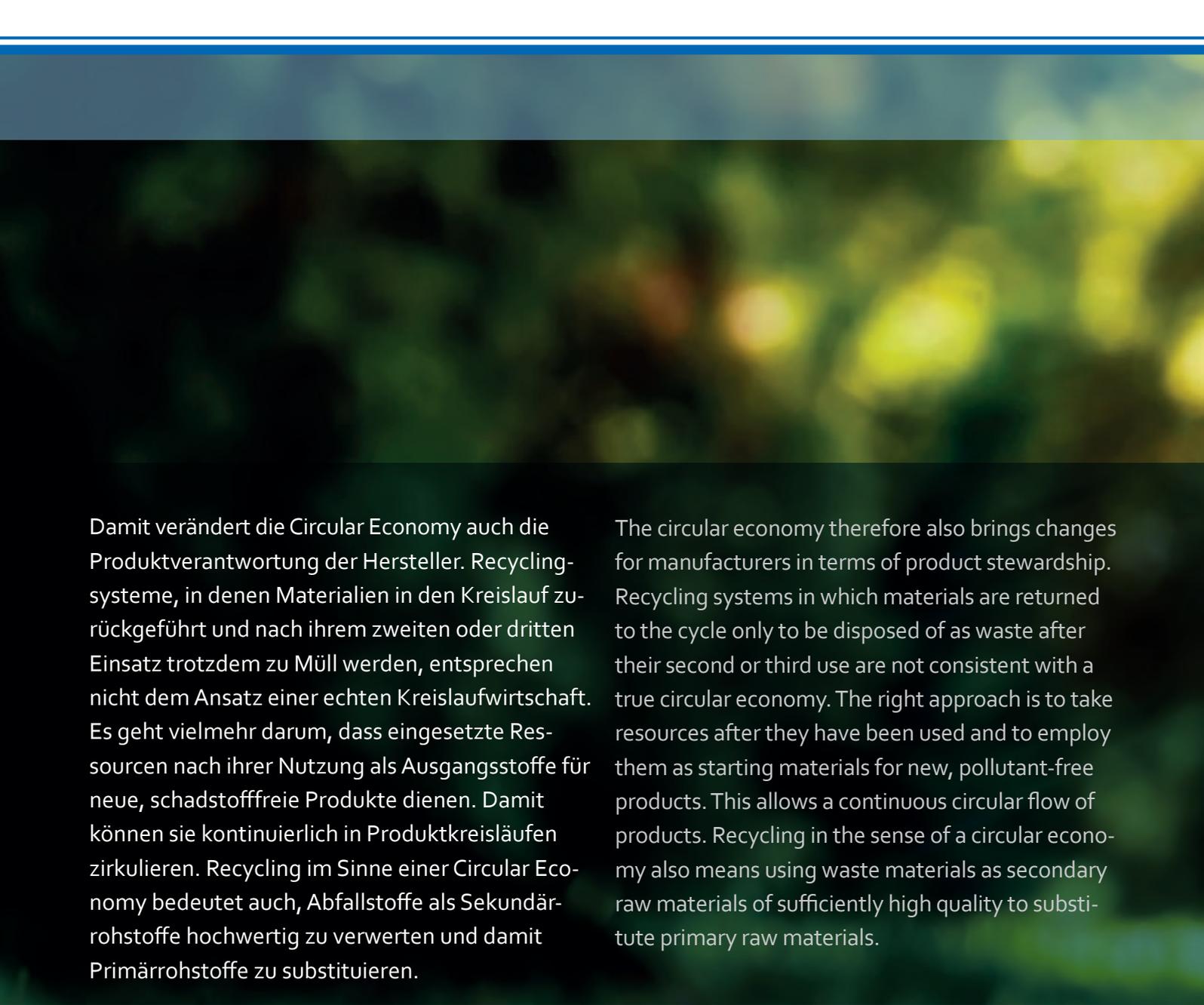
// Focus Report

Ohne ein Gegensteuern wird bis 2050 der weltweite Ressourcenverbrauch so hoch sein, dass wir theoretisch drei Erden verbrauchen.

Mit Circular Economy wird der Ressourcenverbrauch gebremst, die Abhängigkeit von Rohstoffimporten aus politisch unsicheren Ländern vermieden und der Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase reduziert. Eine leistungsfähige, kreislauforientierte Wertschöpfung kann aber nicht nur die menschlichen Lebensgrundlagen erhalten, sondern auch Wohlstand ermöglichen. Der Lösungsweg dazu lautet: reduce, repair, rethink, reinvent, recycle. Produkte, Güter und Prozesse sollten idealerweise so aufgebaut sein, dass kein Abfall übrigbleibt. Dafür kann auch ein kurzlebiges Produkt gut sein, wenn es sich dadurch an anderer Stelle intelligent wieder in eine andere zirkuläre Wertschöpfungskette einbauen lässt. Dies erfordert einen Paradigmenwechsel, der alle Bereiche betrifft: Rohstoffproduktion, Transport, Verarbeitung, Produktdesign, Handel, Konsum und Abfallwirtschaft.

consumption of resources will be so high by 2050 that the world will theoretically be consuming as if there were three.

The circular economy will have the effect of slowing down the consumption of resources, avoiding dependence on raw material imports from politically unstable countries, and reducing emissions of harmful greenhouse gases. Efficient cycles and circular value added processes can not only preserve the basis of human life, but also enable prosperity. The way to reach a solution is to reduce, repair, rethink, reinvent and recycle. Products, goods and processes should ideally be made and structured in such a way as to generate zero waste. A product with a short service life can also be fit for purpose if it lends itself to intelligent integration at another point into another circular value chain. This calls for a paradigm shift incorporating all the relevant aspects, from the production of primary materials, transportation, processing, product design, trade and consumption right through to waste management.



Damit verändert die Circular Economy auch die Produktverantwortung der Hersteller. Recyclingsysteme, in denen Materialien in den Kreislauf zurückgeführt und nach ihrem zweiten oder dritten Einsatz trotzdem zu Müll werden, entsprechen nicht dem Ansatz einer echten Kreislaufwirtschaft. Es geht vielmehr darum, dass eingesetzte Ressourcen nach ihrer Nutzung als Ausgangsstoffe für neue, schadstofffreie Produkte dienen. Damit können sie kontinuierlich in Produktkreisläufen zirkulieren. Recycling im Sinne einer Circular Economy bedeutet auch, Abfallstoffe als Sekundärrohstoffe hochwertig zu verwerten und damit Primärrohstoffe zu substituieren.

The circular economy therefore also brings changes for manufacturers in terms of product stewardship. Recycling systems in which materials are returned to the cycle only to be disposed of as waste after their second or third use are not consistent with a true circular economy. The right approach is to take resources after they have been used and to employ them as starting materials for new, pollutant-free products. This allows a continuous circular flow of products. Recycling in the sense of a circular economy also means using waste materials as secondary raw materials of sufficiently high quality to substitute primary raw materials.

Der Wandel von einer linearorientierten Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft wird eine richtungsweisende Transformation des aktuellen Wirtschaftssystems auslösen, vergleichbar mit den Veränderungen durch die Industrielle Revolution. Gerade in der Kreislaufwirtschaft zeigt sich die Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie. Indem Unternehmen in das nachhaltige Design von Produkten und Prozessen sowie zirkuläre Geschäftsmodelle investieren, können sie ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern.

The shift from a linear economy to a circular economy will trigger a landmark transformation of the current economic system, comparable to the changes brought about by the Industrial Revolution. The capacity of German industry for innovation really comes to the fore in the circular economy. Companies can increase their competitiveness by investing in the sustainable design of products and processes and in circular business models.

Auch die Forschung ist gefordert: Die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen am ZSW sehen die Chancen, die eine Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft bietet, und geben Antworten auf

There are also calls for action in the research community, and the scientists at the ZSW see the opportunities offered by switching to a circular economy and provide answers to various questions. How, for example, can critical raw materials in particular be recycled? What substitution rates are

// Focus Report



Fragen wie: Wie können vor allem kritische Rohstoffe im Kreislauf geführt werden? Welche Substitutionsquoten sind möglich? Wie können wir sorgsam mit endlichen Rohstoffen umgehen und aus vermeintlichem Abfall hochwertige Sekundärrohstoffe gewinnen? Unser Ziel ist es, einen positiven ökologischen Fußabdruck mit optimierten Kreisläufen zu schaffen, die wirtschaftlich sind. In diesem Schwerpunktbericht werden exemplarisch anhand laufender Projekte Beispiele für technologische Wege aufgezeigt, um den Verbrauch von Primärrohstoffen zu senken und geschlossene Stoffkreisläufe zu schaffen – damit die Transformation in eine zukunftsfähige Kreislaufwirtschaft im Sinne des europäischen Green Deals gelingen kann.

possible? How can we be sparing with finite raw materials and obtain high-quality secondary raw materials from materials perceived as waste? Our goal is to leave a favourable carbon footprint with optimised cycles which are economical. This Focus Report takes current projects as examples of ways of using technology to reduce the consumption of primary raw materials and to close material cycles – so as to allow the transformation to a sustainable circular economy to succeed as envisaged in the European Green Deal.



// Batterien: Recycling, Rohstoffe und ressourcenschonende Verfahren

// Batteries: recycling, raw materials and resource-efficient processes

Im Jahr 2021 waren weltweit 17 Millionen Elektro-Pkw unterwegs, deren Anzahl bis 2030 auf 300 Millionen steigen könnte. Hinzu kommen Busse, Lkw, unzählige E-Bikes und Pedelecs sowie Elektro-scooter und andere Fahrzeuge. Ein flächendeckendes Recycling von Antriebsbatterien wird deshalb sowohl für eine klimaneutrale Wirtschaft als auch für die Bereitstellung von (Sekundär-)Rohstoffen unerlässlich. Hochwertiges Recycling stärkt dabei gleichzeitig auch die Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Industrie.

Heutige Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien gewinnen nur ausgewählte Metalle zurück, Lithium geht dabei größtenteils verloren, Grafit sogar vollständig. Aber auch das wird sich ändern. Große Mengen an Metallen wie Kupfer, Nickel, Kobalt, Aluminium und Lithium machen das Batterierecycling wirtschaftlich lukrativ, denn eine Tonne nickelhaltiges Gestein aus einer Nickelmine enthält nur rund 20 Kilogramm Nickel. In einer Batterie, wie sie etwa für einen Mittelklassewagen gebraucht wird, sind jedoch bereits 60 Kilogramm Nickel enthalten. Bei einem Batteriegewicht von 500 Kilogramm entspricht dies einer sechsfachen Anreicherung des Metalls im Vergleich zur Mine. Bei Lithium ist dieser Faktor noch viel höher: 6 Kilogramm Lithium in einer Batterie ersparen beim erfolgreichen Recycling das Aufarbeiten mehrerer tausend Liter an lithiumhaltiger Salzlösung.

There were 17 million electric cars on the road worldwide in 2021, and that number could rise to 300 million by 2030. There are also buses, trucks, countless e-bikes and pedelecs as well as electric scooters and other vehicles. A nationwide infrastructure for the recycling of electric vehicle batteries is therefore essential both for a climate-neutral economy and for the provision of (secondary) raw materials. High-level recycling will at the same time strengthen the resilience and competitiveness of the German and European industry.

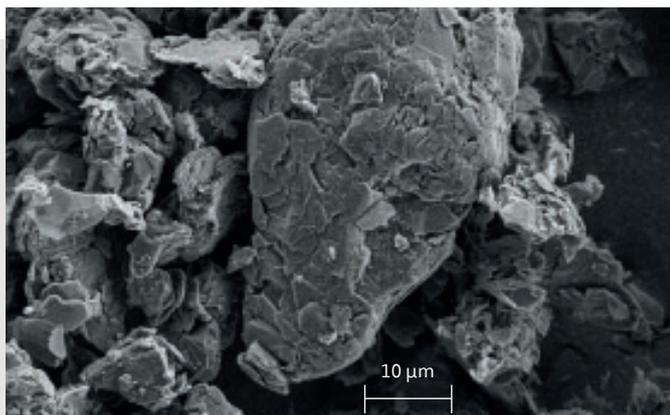
The current recycling processes for lithium-ion batteries only recover selected metals, with extensive wastage of lithium and complete loss of graphite. But this too will change. Large quantities of metals like copper, nickel, cobalt, aluminium and lithium make battery recycling a lucrative business because a ton of nickel-bearing rock from a nickel mine only contains around 20 kilogrammes of nickel, but a battery of the kind used in a mid-range car already contains 60 kilogrammes of nickel. With a battery weighing 500 kilogrammes, this corresponds to a sixfold enrichment of the metal as compared to its condition straight from the mine. With lithium, this factor is even higher in that six kilogrammes of lithium in a battery will – if successfully recycled – save the processing of several thousand litres of saline solution containing lithium.



GRAFIT UND KRITISCHE METALLE UMWELTSCHONEND REAKTIVIEREN

In dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Entwicklungsprojekt „Kathoden- und Anodenmaterialien aus recycelten Lithium-Ionen-Batterien (RecycleMat)“, das im Herbst 2022 erfolgreich abgeschlossen wurde, hat das ZSW ein ressourcenschonendes Verfahren entwickelt, um Aktivmaterialien aus gebrauchten oder defekten Batterieelektroden mechanisch zu trennen, zu reinigen und über eine Wärmebehandlung zu neuwertigen Pulvern aufzubereiten. Das neue Recyclingverfahren ermöglicht es, ausrangierte Batterieelektroden mit den heute gängigen Kathoden aus Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxiden und einer Anode aus Grafit zu reaktivieren und dann direkt in neuen Zellen einzusetzen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren bleiben die Aktivmaterialien als solche erhalten. Dies vermeidet das bisher übliche und energieintensive chemische Auflösen und Wiedergewinnen der metallischen Komponenten bei gleichzeitigem Verlust des Graphits.

Im Rahmen des Projekts mussten insbesondere für das Recycling des Graphits aus dem Minuspol (Anode) der Batterie neue Ansätze und Verfahren entwickelt werden, da Grafit heute nicht zurückgewonnen, sondern meistens verbrannt wird. Dabei stellte die Reinigung des Graphits eine der größten Herausforderungen für direkte Recyclingkonzepte dar. Die Lösung des Problems war eine komplexe Temperaturbehandlung, die sowohl die Oberfläche der Partikel von Verunreinigungen befreit als auch die kristalline Materialstruktur wiederherstellt. Das gewonnene Grafitpulver verfügt über 95 Prozent des spezifischen Energieinhalts des Ausgangsmaterials und kann direkt wieder in neuen Batterien verbaut werden. So recycelte Kohlenstoffe wurden am ZSW direkt neuen Anoden beigemischt und in Vollzellen elektrochemisch evaluiert.



ECO-FRIENDLY REACTIVATION OF GRAPHITE AND CRITICAL METALS

In the “Cathode and Anode Materials from Recycled Lithium-ion Batteries (RecycleMat)” development project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, which was successfully completed in autumn 2022, the ZSW developed a resource-efficient process for the mechanical separation, cleaning and heat treatment of active materials from used or defective battery electrodes to produce reconditioned powders which are as good as new. The new recycling process makes it possible to reactivate discarded battery electrodes with modern-day cathodes made of lithium-nickel-manganese-cobalt oxides and a graphite anode and then use them straight away in new cells. In contrast to conventional processes, the active materials are preserved as such. This avoids the energy-intensive process of dissolving the chemicals and recovering the metallic components, which has been the prevailing practice until now, inevitably entailing the loss of the graphite.

New approaches and processes had to be developed in the project, especially for the recycling of the graphite from the negative terminal of the battery (anode) because graphite is not recovered these days but is typically incinerated. The process of cleaning the graphite was one of the biggest challenges for direct recycling systems. The solution to the problem was a complex heat treatment which removes impurities from the surface of the particles and restores the crystalline structure of the material. The graphite powder obtained in this way has 95 per cent of the specific energy content of the original material and can be used again immediately in new batteries. Carbon recycled in this way has been added directly to new anodes at the ZSW and has undergone electrochemical evaluation in full cells.

// Aufbereitetes Grafit aus Anodenmasse.
Die Oberfläche der Partikel wurde von Verunreinigungen befreit und die kristalline Struktur wiederhergestellt.
// Graphite prepared from anode mass.
The surface of the particles has been cleared of impurities and the crystalline structure has been restored.



KATHODENMASSEN AUFBEREITEN

Die Materialien mit dem höchsten Wertanteil sind die Kathoden im Pluspol der Batterie, da sie teure Metalle wie Nickel, Mangan, Kobalt und Lithium enthalten. Bei den üblichen, energieaufwendigen Recyclingprozessen werden die Kathodenmaterialien in Säure aufgelöst und dann wieder in Batterierohstoffe umgewandelt. Wie beim oben erwähnten ZSW-Verfahren zum Recycling von Grafit können die Kathodenmaterialien bereits nach zwei einfachen Prozessschritten direkt wieder in neuen Batterien eingesetzt werden und zeigen ebenfalls deutlich mehr als 90 Prozent ihrer ursprünglichen Kapazität.

Um Lieferengpässe bei Rohstoffen für Lithium-Ionen-Batterien zu vermeiden, sind neben Altbatterien bereits auch Produktionsausschüsse als wertvolle Sekundärquelle für kritische Materialien in den Fokus gerückt. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt „Action“ erforscht das ZSW die Rückführung von Elektrodenausschüssen wie Einfahrmaterial, Halbzeuge mit Beschichtungsdefekten oder Elektrodenverschnitte. Hierfür wird der Einsatz von bestehenden sowie neu zu entwickelnden Verfahren untersucht. Der Schwerpunkt liegt vor allem auf der industrienahen Produktion und Charakterisierung von Elektrodenpasten, Elektrodenbändern und Batteriezellen, die anteilig Rezyclat enthalten.

PREPARATION OF CATHODE MASSES

The materials with the highest fraction of the value are the cathodes in the positive terminal of the battery because they contain expensive metals like nickel, manganese, cobalt and lithium. The customary recycling processes are high in energy consumption, given that the cathode materials are dissolved in acid and then converted back into raw battery materials. As with the aforementioned ZSW process for the recycling of graphite, the cathode materials can be used again in new batteries straight away after a process involving just two simple steps and likewise exceed well over 90 per cent of their original capacity.

In order to avoid bottlenecks in the supply chain for raw materials for lithium-ion batteries, the focus has already shifted not only to spent batteries but also to production rejects as a valuable secondary source of critical materials. In the “Action” project funded by the Federal Ministry of Education and Research, the ZSW is conducting research into the recovery of electrode rejects, such as running-in materials, semi-finished products with coating defects, and electrode scrap, duly examining the application of existing methods and processes yet to be developed. The main focus is on industry-scale production and specification of electrode slurries, electrode strips and battery cells which contain a proportion of recycled material.



// Elektrodenausschüsse wie diese defekte kobalthaltige Kathode sind eine wertvolle Sekundärquelle für kritische Rohstoffe.
 // Electrode rejects like this defective cathode containing cobalt constitute a valuable secondary source of critical raw materials.



// Phosphor für die Nahrungsmittelerzeugung

Ohne Phosphor, einen endlichen und nicht substituierbaren Schlüsselnährstoff, gäbe es auf der Erde kein Leben. Phosphor wird für die Bildung von DNA-Bausteinen, Muskeln und Knochen benötigt. Gleichzeitig wird er als Rohstoff in vielen Industriebereichen wie bei der Herstellung von Düngemitteln oder Viehfutter verwendet. Menschen und Tiere nehmen Phosphor über die Nahrung auf. Der vom Menschen wieder ausgeschiedene Phosphor gelangt schließlich in das Abwassernetz.

Phosphor wird aus Phosphatgestein gewonnen und wird 2014 unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit in der EU als kritischer Rohstoff eingestuft, denn die weltweit größte Lagerstätte befindet sich in der Westsahara – seit Jahrzehnten eine Konfliktregion. Aber auch China und Russland sind wichtige Phosphorproduzenten. Die Verfügbarkeit dieser Ressourcen ist also zum einen langfristig in ihrem natürlichen Vorkommen begrenzt und zum anderen an die geopolitische Lage gekoppelt. Damit ist die Rückgewinnung von Phosphor aus phosphatreichen Abfallströmen von großer Bedeutung.

// Phosphorus for food production

Without phosphorus, a finite and non-substitutable key nutrient, there would be no life on Earth. Phosphorus is essential for the formation of DNA building blocks, muscles and bones. It is also vital to many sectors of industry where it is used as a raw material for the production of fertilisers or fodder, for example. Humans and animals ingest phosphorus through food. The phosphorus excreted by humans ends up in the sewage system.

Phosphorus is extracted from phosphate rock and has been classified as a critical raw material in the EU since 2014, with the security of its supply an issue given that the largest reserves in the world are located in Western Sahara – a region of conflict for decades. But China and Russia are also major phosphorus producers. The availability of these resources is therefore limited in terms of lasting natural deposits and is linked to the geopolitical situation. These two factors account for the importance of the recovery of phosphorus from phosphate-rich streams of waste.



// Im ZSW-Labor werden hochwertige Phosphor-Rezyklate gewonnen.
// Recycled phosphorus of a high quality is obtained in the ZSW laboratory.



Allein in Deutschland könnte die Hälfte des Phosphor-Mineraldüngerbedarfs durch die Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen gedeckt werden. Um eine nachhaltige und effiziente Circular Economy mit hochwertigen Phosphor-Rezyklaten zu erreichen, hat das ZSW gemeinsam mit Partnern einen ganzheitlichen Kreislauf entwickelt, der aus mehreren Prozessschritten besteht: Dem Klärschlamm werden zunächst Alkali-Additive beigemischt, bevor er in einer Wirbelschichtanlage verbrannt wird. Durch die Additivzugabe wird die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors deutlich erhöht. Die Verbrennungsbedingungen und Additivzugabe können so eingestellt werden, dass es zusätzlich zu einer Mobilisierung von Schwermetallen während der Verbrennung kommt. Die phosphorhaltige Asche wird im Rauchgas als Flugasche mitgerissen und anschließend bei hohen Temperaturen von > 700 Grad abgeschieden. Im Gegensatz zur üblichen Klärschlammverbrennung wird mit dieser Technologie ein nahezu schadstofffreier phosphorhaltiger Wertstoff mit hoher Pflanzenverfügbarkeit gewonnen, der anschließend zu hochwertigem Dünger verarbeitet wird.

Nachdem am ZSW die grundsätzliche technische Machbarkeit der Klärschlammverbrennung mit Alkali-Additivzugabe in der eigenen Wirbelschichtversuchsanlage im Technikumsmaßstab von $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ nachgewiesen werden konnte, wird das P-XTRACT®-Verfahren nun in einer 1-Megawatt-Pilotanlage in der Kläranlage Breisach-Grezhausen unter realen Bedingungen erprobt. Im Sommer 2022 wurde mit dem Bau der Anlage begonnen, die im Jahr 2023 in Betrieb gehen und insgesamt rund 10.000 Tonnen Klärschlamm pro Jahr von sieben Kläranlagen der Region verarbeiten soll. Mit der Pilotanlage sollen über 80 Prozent des im Klärschlamm vorhandenen Phosphors recycelt werden. Das ZSW begleitet diese erste großtechnische Umsetzung.

In Germany alone, half of the mineral fertiliser demand could be met by phosphorus recovery from sewage sludge. In order to achieve a sustainable and efficient circular economy with recycled phosphorus of a high quality, the ZSW and its partners have developed an end-to-end process consisting of several steps, starting with the incorporation of alkali additives into the sewage sludge before it is incinerated in a fluidised bed system. The supply of the additives significantly increases the plant availability of the phosphorus. The incineration conditions and additive dosage can be adjusted in such a way as to allow a mobilisation of heavy metals during the incineration process as well. The ash containing the phosphorus is carried in the flue gas as fly ash and is then separated at high temperatures of > 700 °C. In contrast to the end result with conventional sewage sludge incineration, this technology produces a virtually pollutant-free material containing phosphorus with high plant availability which is then processed into high-grade fertiliser.

Having demonstrated the basic technical feasibility of sewage sludge incineration with alkali additives at the ZSW on a pilot scale of $10 \text{ kW}_{\text{th}}$ in its own fluidised bed test facility, the P-XTRACT® process is now being tested in real conditions in a one-megawatt pilot installation at the Breisach-Grezhausen sewage treatment plant. Work began in the summer of 2022 on the construction of the plant which is due to go into operation in 2023 with a view to processing a total of around 10,000 tons of sewage sludge per year from seven sewage treatment plants in the region. The aim is to recycle more than 80 per cent of the phosphorus present in the sewage sludge with the pilot system. The ZSW will be following every step in this first large-scale pilot.



// Die Wirbelschichtversuchsanlage am ZSW.
// The fluidised bed test facility at the ZSW.



// Recycling von Kunststoff zu Wasserstoff und Kohlenstoff

// Recycling of plastic to hydrogen and carbon

Kunststoff wird häufig als Werkstoff des 21. Jahrhunderts bezeichnet und ist in unserem Leben allgegenwärtig. Die globale Produktion – die vor allem auf Erdöl basiert – liegt aktuell bei knapp 400 Millionen Tonnen pro Jahr, wobei vor allem Einwegprodukte und Verpackungen hergestellt werden. Weltweit wird die Hälfte der Kunststoffabfälle deponiert und 20 Prozent der Kunststoffabfälle gelangen unkontrolliert in die Umwelt. Nur ein Fünftel wird zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt, und nicht einmal 10 Prozent der erzeugten Kunststoffe werden weltweit recycelt. Immerhin liegt die Recyclingquote in Deutschland bereits bei etwa 40 Prozent.

Für sortenreine oder einfach aufzubereitende Kunststoffabfälle kommen werkstoffliche Recyclingverfahren in Frage. Nicht sortenreine oder problematische Kunststoffabfälle werden bisher entweder entsorgt oder verbrannt. Im Sinne einer Kreislaufwirtschaft müssen auch diese Abfälle verwertet werden – idealerweise zu marktfähigen, qualitativ hochwertigen Recyclingrohstoffen. Für die Bereitstellung von gasförmigen, flüssigen und festen Recyclingrohstoffen bieten sich Verfahren der Thermolyse beziehungsweise Pyrolyse an. Der organische Ausgangsstoff wird dabei durch Erhitzen in mehrere Produkte zersetzt. Bei Temperaturen bis zu 1.000 Grad wird mit Hilfe eines Hochtemperatur-Drehrohrverfahrens aus schwierig aufzubereitenden Kunststoffmischfraktionen wie Mehrschichtkunststoff-Verpackungsabfällen CO₂-neutraler Wasserstoff gewonnen.

Plastic is often called the material of the 21st century and is ever-present in our lives. Global production – which is mainly based on crude oil – is currently running at almost 400 million tons per year, primarily for the manufacture of single-use products and packaging. Worldwide statistics suggest that half of all plastic waste goes to landfill and 20 per cent of plastic waste goes unchecked on its release into the environment. Only one fifth is used to generate heat and electricity, and not even 10 per cent of the plastics produced are recycled around the world. At least in Germany the recycling rate is already at around 40 per cent.

Compound recycling processes are suitable for use for unmixed or easily processed plastic waste. The only solutions to date for non-homogeneous or problematic plastic waste have been disposal or incineration. In the interests of a circular economy, this waste must also be recycled – ideally into marketable recycled materials of a high quality. Thermolysis and pyrolysis are suitable processes for the provision of recycled resources in gas, liquid and solid form. The organic source material is broken down into several products in the heating process in these cases. Carbon-neutral hydrogen is obtained from mixed plastic fractions which are difficult to process, such as multilayer plastic packaging waste, at temperatures of up to 1,000 degrees in a high-temperature rotary kiln system.



// Millionen Tonnen von Kunststoffabfällen landen auf Deponien.
 // Millions of tonnes of plastic waste end up in landfill.



Mit diesem Verfahren kann zudem ein flexibel verwertbarer Recycling-Kohlenstoff hergestellt werden, der beispielsweise unter Verwendung von Elektrolysauerstoff mittels Oxyfuel-Verbrennung in Form von CO₂ für neue Kunststoffe verwendet werden kann (Carbon Capture and Use (CCU)). Alternativ könnte der feste Kohlenstoff via „Carbon Capture and Storage“ (CCS) einfacher als CO₂ gespeichert werden. Damit würden sich nach erfolgreicher Entwicklung und Industrialisierung pro verarbeitete Tonne Kunststoffabfall bis zu 3 Tonnen CO₂-Emissionen vermeiden lassen, die bislang bei der Verbrennung emittiert werden.

Zur Weiterentwicklung des Hochtemperatur-Drehrohrverfahrens erfolgte am ZSW das Engineering eines speziell hierfür ausgelegten und elektrisch beheizbaren Drehrohr-Prototyps, der im Jahr 2023 in Betrieb gehen soll. Die Technikumsapparatur ist so konzipiert und prozessseitig ausgestattet, dass ein Hochskalieren in den industriellen Maßstab vereinfacht wird. Ziel ist die Entwicklung eines wettbewerbsfähigen und flexibel einsetzbaren Verfahrens für schwierig aufzubereitende Kunststoffabfallfraktionen, um damit einen Beitrag für die zukünftige Erzeugung von klimaneutralem Wasserstoff und ein zirkuläres Wirtschaften ohne Inanspruchnahme weiterer fossiler Ressourcen und resultierender CO₂-Emissionen zu leisten.

A versatile recycled carbon can be produced at the same time in this process also lends itself to the production of a versatile recycled carbon which can be used in the form of CO₂ for new plastics, for example, using oxygen produced by electrolysis by means of oxy-fuel combustion (carbon capture and utilisation (CCU)). Alternatively, the solid carbon could be stored more easily as CO₂ using carbon capture and storage technology (CCS). If successfully developed and scaled up to industrial proportions, this would make it possible to sidestep existing incineration emissions which amount to up to 3 tons of CO₂ per processed ton of plastic waste.

Engineering work at the ZSW on the high-temperature rotary kiln system resulted in a specially designed and electrically heated rotary kiln prototype which is scheduled to go into operation in 2023. The pilot plant equipment is built in such a way as to facilitate processes and to simplify production on an industrial scale. The aim is to develop a competitive and flexible process for plastic waste fractions which are difficult to process with a view to making a contribution to the future generation of climate-neutral hydrogen and a circular economy without further use of fossil resources and resulting CO₂ emissions.



// Kunststoff ist der Werkstoff des 21. Jahrhunderts.
 // Plastic is the material of the 21st century.



//CO₂-Recycling aus der Luft für Industrieprozesse

// CO₂ recycling from the air for industrial processes

Ohne dass die Menschheit einen Teil des von ihr ausgestoßenen Kohlenstoffs wieder aus der Atmosphäre holt, wird die Erwärmung des Weltklimas nicht auf 1,5 Grad zu begrenzen sein. Durch die Förderung und Verbrennung fossiler Brennstoffe kommt es zu einer Anreicherung von CO₂ in der Atmosphäre, die zur globalen Erwärmung des Klimas führt. Und wenn das Klima dauerhaft wärmer wird, drohen diverse Kettenreaktionen in Gang gesetzt zu werden, mit unabsehbaren Folgen. Um diese Folgen zu verhindern, muss die Menschheit nicht nur neue Klimaemissionen endgültig stoppen; sie muss auch einen Teil der Emissionen wieder zurückholen.

Mit neuen Technologien wie „Direct Air Capture“ (DAC) kann CO₂ der Atmosphäre wieder entzogen und gleichzeitig nutzbringend eingesetzt werden. Neben seiner Relevanz als Treibhausgas wird CO₂ zukünftig auch eine zentrale Rolle als Rohstoff für die Industrie spielen, um fossile Energieträger wie Erdöl oder Erdgas bei der Herstellung von kohlenstoffbasierten Rohstoffen oder Kraftstoffen zu ersetzen. Das ZSW entwickelt eigene DAC-Verfahren und unterstützt die Industrialisierung der DAC-Technologie im Rahmen des vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts „DAC-BW“. Grundlage des Projekts bildet dabei der praxisnahe Betrieb einer DAC-Anlage mit einer Abscheiderate von ca. 100 Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr, die im Frühjahr 2023 am ZSW in

It will not be possible to limit global warming to 1.5 degrees unless some of the carbon emitted by humanity is taken back out of the atmosphere. The process of extracting and burning fossil fuels leads to an accumulation of CO₂ in the atmosphere which in turn causes global warming. And a persistent rise in temperatures comes with a threat that various chain reactions will be set in motion – with unforeseeable consequences. In order to prevent these consequences, it will not suffice for mankind to stop generating new emissions. It will also have to retrieve some of the emissions.

With new technologies like direct air capture (DAC) the CO₂ can be extracted from the atmosphere and used to advantage at the same time. In addition to its relevance as a greenhouse gas, CO₂ will also play a key role in future as a raw material for industry, replacing fossil fuels like crude oil or natural gas in the production of carbon-based raw materials or fuels. The ZSW is developing its own DAC processes and lending its support to the industrial roll-out of DAC technology in the “DAC-BW” project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Transport. Central to the project will be the operation of a prototype DAC system with a separation rate of around 100 tons of carbon dioxide per year which is set to go into operation at the ZSW in the spring of 2023. Another project launched at the end of 2022 is called “Air2Fuel”, and its aims are to



// Mit Direct Air Capture wird CO₂ aus der Atmosphäre entzogen.

// Direct air capture removes CO₂ from the atmosphere.



Betrieb gehen wird. Darüber hinaus wurde Ende 2022 mit „Air2Fuel“ ein weiteres Projekt gestartet, das zum Ziel hat, die Technologie auf Abscheideraten von 1.000 Tonnen CO₂ pro Jahr auszubauen und Skalierungskonzepte für bis zu 100.000 Tonnen CO₂ pro Jahr zu entwickeln.

Jährlich werden in Deutschland 30 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid in Deutschland stofflich genutzt, so beispielsweise für die Produktion von Polymeren, Harnstoff oder Lösungsmitteln. Eine direkte Nutzung erfolgt beispielsweise bei der Herstellung von Kältemitteln, Düngern, Feuerlöschmitteln oder auch in der Lebensmittelindustrie bei der Carbonisierung von Getränken. Im Bereich der Energieträger und Kraftstoffe wird CO₂ zukünftig in großen Mengen für die Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen (eFuels) benötigt.

KOSTENEFFIZIENTE CO₂-GEWINNUNG

Die große technologische Herausforderung bei der CO₂-Gewinnung aus Luft liegt in der geringen Konzentration des Kohlenstoffdioxids von ca. 415 ppm (parts per million), was zu hohen Luftvolumenströmen und somit zu hohen Energieeinsätzen führt. Wichtig ist, dass der Luftvolumenstrom keine Zustandsänderung wie beispielsweise Temperatur- oder Druckveränderung erfährt, um eine möglichst energie- und somit kosteneffiziente CO₂-Gewinnung realisieren zu können. Vor diesem Hintergrund hat sich das ZSW für ein kontinuierliches Gaswäscheverfahren auf Polyethylenimin-Basis entschieden, das aus einer Absorptions- und einer Desorptionsstufe besteht. Durch eine kontinuierliche Prozessführung werden Leerlaufzeiten, hohe Materialbelastungen und schwankende CO₂-Qualitäten vermieden. Ein Großteil des Energiebedarfs kann durch Abwärme, beispielsweise aus nachgelagerten Syntheseprozessen, gedeckt werden. Die hohe Reinheit des aufkonzentrierten CO₂ ermöglicht neben seiner Speicherung oder direkten Nutzung auch eine Weiterverwertung als Rohstoff für die Herstellung von eFuels oder eChemicals. Infolge der robusten Wäschertechnologie ist auch eine sehr gute Skalierbarkeit des Verfahrens gegeben, was mit Blick auf die prognostizierten erforderlichen Abscheideraten von weltweit ca. 2 Milliarden Tonnen CO₂ jährlich zum Erreichen der Netto-Null-Emissionen im Jahr 2050 wichtig ist.

expand the technology to achieve separation rates of 1,000 tons of CO₂ per year and to develop methods for scaling up to as many as 100,000 tons of CO₂ per year.

Every year in Germany, 30 million tons of carbon dioxide are used as materials for various purposes, such as the production of polymers, urea or solvents. Examples of direct use include the manufacture of refrigerants, fertilisers and fire extinguishing agents or the carbonation of beverages in the food industry. Large quantities of CO₂ will be required in the field of energy sources and fuels in future for the production of synthetic hydrocarbons (e-fuels).

COST-EFFICIENT CO₂ EXTRACTION

The major technological challenge in extracting CO₂ from air lies in the low concentration of carbon dioxide of around 415 ppm (parts per million), which leads to high airflow rates and therefore to high levels of energy input. It is important that there is no change in the airflow situation, such as changes in temperature or pressure, in order to be able to maximise the energy efficiency and therefore the cost efficiency of the CO₂ extraction process. Given these basic requirements, the ZSW opted for a continuous gas scrubbing process based on polyethylene imine, consisting of an absorption and a desorption stage. Idle times, high material stress levels and fluctuating CO₂ qualities are avoided through continuous process control. A large proportion of the energy required can be supplied by waste heat from such sources as downstream synthesis processes. The high purity of the concentrated CO₂ enables not only the storage or direct use but also the further processing of the CO₂ as a raw material for the production of e-fuels or e-chemicals. The robust scrubber technology also makes the process extremely scalable, which is important in view of the forecasts that annual worldwide separation rates of around 2 billion tons of CO₂ will be required to achieve net zero emissions in 2050.



// Reparatur von Photovoltaikmodulen

Die Photovoltaik (PV) ist eine Schlüsseltechnologie der globalen Energiewende, sodass der Fokus der Entwicklung heute eher auf der Effizienzsteigerung und Kostensenkung liegt als auf Themen der Kreislaufwirtschaft, Reparaturfähigkeit und Lebensdauer. Dennoch müssen auch diese Aspekte stärker in den Mittelpunkt rücken, um die Klimaziele in Deutschland zu erreichen. Dafür muss sich die installierte Leistung nach dem aktuellen Ausbauziel der Bundesregierung bis 2030 auf 216 Gigawatt erhöhen, und bis 2045 müssen es rund 450 Gigawatt sein. Das entspricht einer Menge von ca. 20 Millionen Tonnen installierter PV-Module allein bis 2030. Geht man von einem jährlichen Ausschuss von 5 Prozent der

// Repair of photovoltaic modules

Photovoltaics technology (PV) is so key to the global energy transition that the focus of its development today is rightly more on increasing efficiency and reducing costs than on issues relating to the circular economy, reparability and service life. It is essential, however, to pay closer attention to these aspects as well in order to achieve the climate targets in Germany. The current expansion target set by the German government dictates that the installed capacity must increase to 216 gigawatts by 2030, and it will have to be around 450 gigawatts by 2045. This corresponds to about 20 million tons of installed PV modules by 2030 alone. Assuming that five per cent of the modules are scrapped annually due to



// Ein ZSW-Mitarbeiter inspiziert feldgealterte PV-Module mit beschädigten Rückseitenfolien.
// A ZSW employee inspects field-aged PV modules with damaged backsheets.

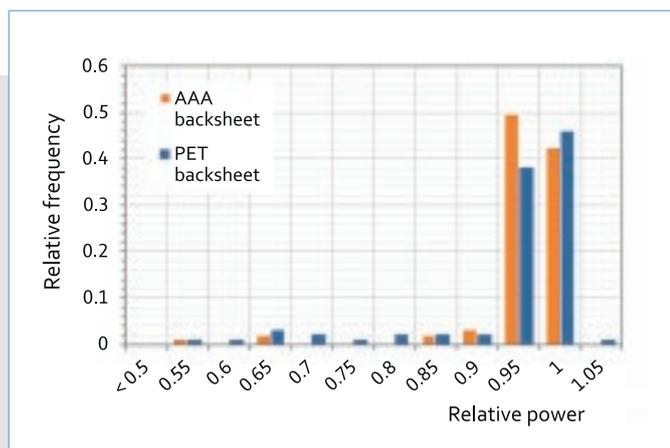


Module aufgrund von Defekten oder Repowering aus, wären das im Schnitt etwa eine Million Tonnen Elektroschrott pro Jahr – ebenso viel, wie heute als Elektro- und Elektronikschrott aus Computern, Smartphones, Fernsehern, Kühlschränken oder Waschmaschinen in Deutschland anfällt. Künftig werden also PV-Module einen enorm großen Anteil am Elektroschrott ausmachen. Damit rücken neben dem Recycling eine lange Lebensdauer und die Reparaturfähigkeit von Modulen stärker in den Fokus.

Durch die vielen unterschiedlichen PV-Module am Markt gibt es eine Vielzahl an Alterungserscheinungen. Um gezielt Reparaturlösungen zu entwickeln, ist es sinnvoll, die Fehlerbilder zu charakterisieren und zu kategorisieren. Diesen Katalog von Fehlerbildern erstellt das ZSW im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojektes „ANOMALOUS“ im Verbund mit weiteren Forschungspartnern. Damit lässt sich abschätzen, ob die Reparatur eines Moduls wirtschaftlich rentabel und umsetzbar ist oder ob das Modul recycelt werden muss.

defects or repowering, that would mean some one million tons of electrical waste per year on average – equating to the amount of electrical and electronic waste generated in Germany today by discarded computers, smartphones, televisions, refrigerators and washing machines. PV modules will therefore make up a huge proportion of electrical waste in the future. This is why greater emphasis is being laid not only on recycling but also on the length of service life and the reparability of modules.

Given the wide variety of PV modules on the market, there is a great number of signs of ageing. It makes sense to define the fault characteristics and categorise the defect scenarios in order to home in on the right repair solutions. The ZSW is working with other research partners on the compilation of a list of fault characteristics and defect scenarios in the “ANOMALOUS” research project funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action. This will make it possible to gauge whether it is economically viable and feasible to repair a module or whether the module will need to be recycled.



// Leistung von PV-Modulen unter Standardtestbedingungen (STC) mit auffälliger oder schadhafter RSF; unterschieden wird zwischen AAA-RSF und RSF mit PET-Kernschicht.
 // Performance of PV modules under standard test conditions (STC) with problematic or damaged backsheets, differentiating between AAA backsheets and backsheets with PET core layer.

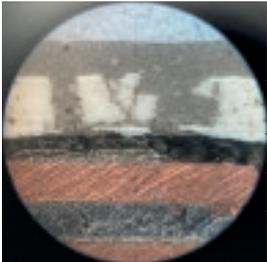
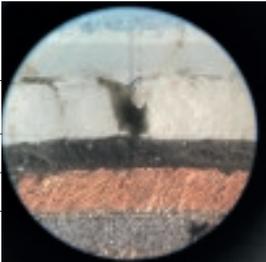


REPARATUR LOHNT SICH

Neben physikalischen Effekten lassen sich sowohl chemische als auch mechanische Beschädigungen an PV-Modulen erkennen. Dazu zählen vor allem Risse in den gängigen Rückseitenfolien (RSF) aus dreischichtigem Polyamid (AAA), die nach rund zehn Jahren Betriebsdauer entstehen können. Bei den AAA-RSF-Modulen zeigen sich vor allem oberhalb der „Busbars“ wie auch im Zellzwischenraum Risse. In diesen Bereichen ist der mechanische Stress in der RSF am größten. Ist die RSF versprödet, kann sie ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Es kommt zu durchgehenden Rissen. Korrosion und damit einhergehende Bildung von Grünspan sind eindeutige Hinweise auf einen Feuchtigkeitseintritt im Modul, der zu Kurzschlüssen und damit zu Schäden oder zu einer Gefährdung von Wartungspersonal führen kann. Risse in der innenliegenden Schicht weisen auf eine Versprödung durch den Eintrag von UV-Strahlung hin. Der sogenannte Auskredungsgrad einer RSF gibt Hinweise auf die Menge der freigesetzten Titandioxid-partikel, die durch photokatalytische Effekte an die Oberfläche treten. Ein weiteres Phänomen bei RSF ist „Yellowing“, das aufgrund von Degradationsprozessen innerhalb des Laminatverbunds entsteht. Da auch fehlerhafte PV-Module meist noch gute Leistung bringen, lohnt sich eine Reparatur in den meisten Fällen.

REPAIR IS WORTHWHILE

In addition to the identification of physical effects, it will facilitate the detection of both chemical and mechanical damage to PV modules. This will mainly include cracks in the backsheets, which are made of three-layer polyamide (AAA) as standard, as can occur after around 10 years of operation. The areas above the “busbars” and the spaces between the cells in the AAA backsheet modules are the most susceptible to cracks. The mechanical stress in the backsheet is greatest in these areas. Once it has become brittle, the backsheet is no longer fit for purpose. The cracks will go all the way through. Corrosion and the accompanying formation of verdigris are clear indications of moisture ingress in the module, potentially leading to short circuits and the inevitable damage as a result, or placing service engineers in danger. Cracks in the inner layer point to embrittlement caused by exposure to UV radiation. The degree of “chalking” to which a backsheet is subject is indicative of the quantity of titanium dioxide particles being released and coming to the surface as a result of photocatalytic effects. Another phenomenon encountered with backsheets is “yellowing” which occurs due to degradation processes within the multilayer laminate. Faulty PV modules usually still perform well, therefore repairs are worthwhile in most cases.

	Repair solutions	
	Three-layer polyamide backsheet	
	Rear encapsulation	
	Copper ribbon	
	Row	

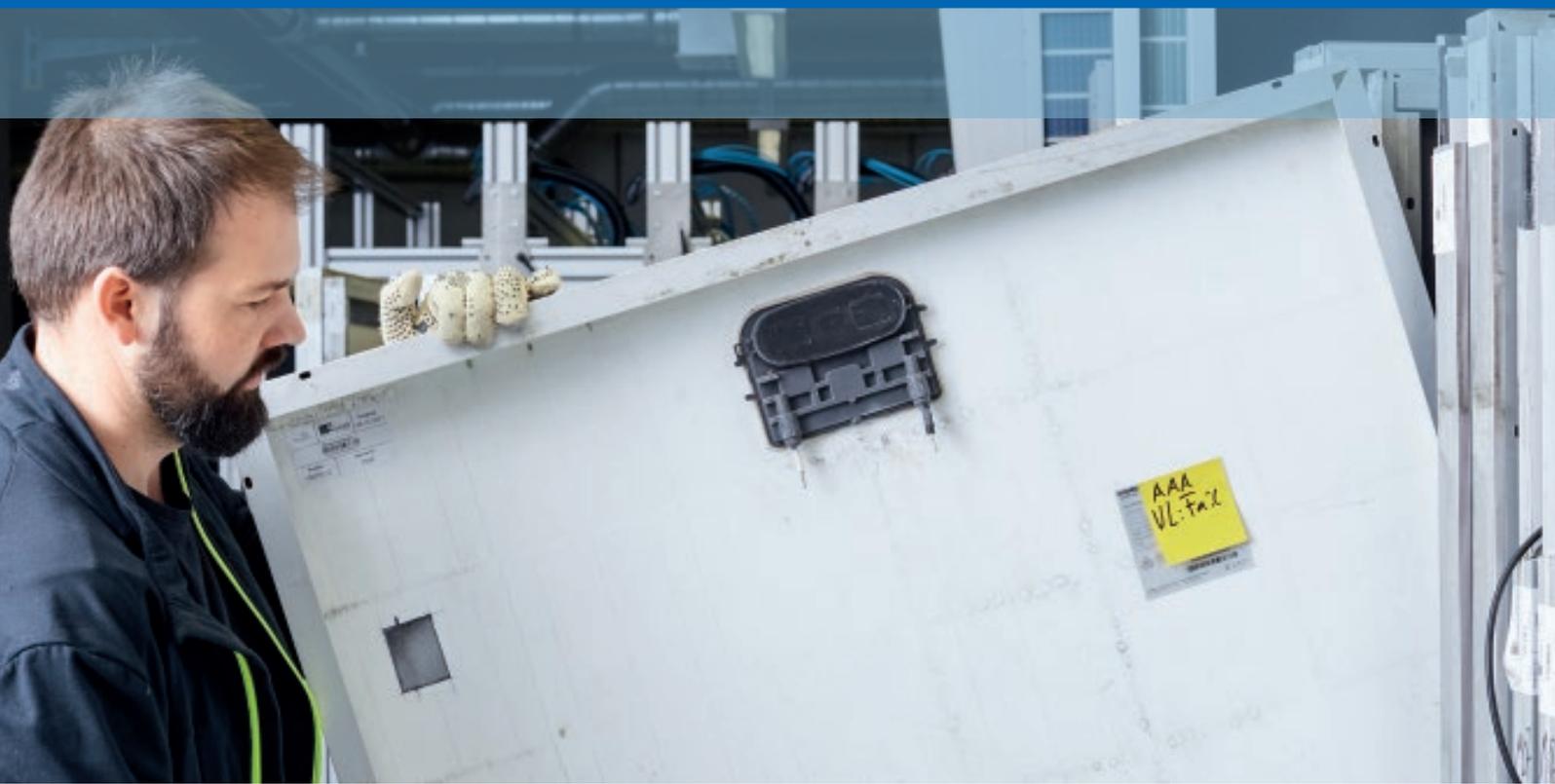
Bonding

- + Constant layer thickness
- + Increased mechanical stability
- Cracks remain in the form of cavities

Coating

- + Cracks filled
- + Reworked
- Layer thickness difficult to control
- Results brittle on examination

// Abdeckung eines Risses mit einer Reparaturfolie (rechts) und Verfüllung eines Risses mit flüssiger Reparaturlösung (links).
 // Covering a crack with repair film (right) and filling a crack with liquid repair solution (left).



REPARATURLÖSUNGEN

Um die Qualität von Reparaturen für verschiedene Beschädigungen der RSF an PV-Modulen einschätzen zu können, hat das ZSW gealterte und beschädigte Module mit unterschiedlichen Ansätzen behandelt und anschließend Stresstests ausgesetzt. Die Reparaturlösungen unterscheiden sich sowohl in ihrer Materialzusammensetzung als auch in ihrer Verarbeitung. So gibt es Reparaturlösungen, die aufgesprüht oder gestrichen werden, andere setzen auf eine Folie, die vollflächig auf die Rückseite eines Moduls geklebt wird. Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Eine Folien-Reparaturlösung sorgt für konstante Schichtdicken und damit für homogene Isolationsfestigkeiten über das Modul, birgt allerdings die Gefahr von Hohlräumen, in denen Wasser kondensieren könnte. Liquide Reparaturlösungen neigen zu ungleichmäßiger Verteilung und damit zu inhomogenen Isolationsfestigkeiten. Versuche mit den beiden Reparaturlösungen waren vielversprechend, die verwendeten Materialien müssen jetzt jedoch noch für die Langzeitstabilität optimiert werden. Gelingt das, wäre der Einstieg in Reparaturlösungen für PV-Module an einem ersten, heute sehr relevanten Beispiel geschafft.

REPAIR SOLUTIONS

In order to be able to assess the quality of repairs for various types of damage to the backsheet on PV modules, the ZSW used different treatments on aged and damaged modules and then subjected them to stress tests. The approaches differ both in terms of the repair material composition and the repair processes applied. Some repairs involve spraying or brushing on a coating while others involve gluing a film to the rear of the module, covering the entire surface. There are advantages and disadvantages in both cases. A film repair solution is good in terms of the constant layer thickness, which ensures homogeneous insulation strength across the module, but it does harbour the risk of cavities in which water could condense. Liquid repair solutions tend to result in uneven distribution and therefore in non-homogeneous insulation strength. Tests with the two repair solutions were promising but the materials must now be optimised with a view to improving long-term stability. Successful results in these tests would pave the way for entry into PV module repairs with reference to a first example which is very relevant today.





BLICK IN DIE ZUKUNFT

Das ZSW deckt in seinen Forschungsthemen wie Batterien, Brennstoffzellen, Elektrolyse und Photovoltaik den kompletten Lebenszyklus eines Produktes ab – von der Materialauswahl und der Entwicklung von Produktionsverfahren sowie der Realisierung marktnaher Prototypen über die Industrialisierung und den Transfer in den realen Markt bis hin zur Wiederverwertung der enthaltenen Rohstoffe am Ende der Nutzungsdauer. Damit können wir den Energiebedarf und Rohstoffeinsatz bereits beim Herstellungsverfahren optimieren und das Produktdesign auf eine zirkuläre Wertschöpfungskette ausrichten.

Ein zukünftiges Thema wird das Aufbereiten der Metalle der Platingruppe (PGM) sein, da sie unverzichtbare Katalysatoren in Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) und Polymerelektrolytmembran-Elektrolyseuren (PEEL) darstellen. Zur Minimierung der Umweltfolgen will das ZSW neue Methoden zur selektiven Auflösung der PGM untersuchen. Hierzu gehören elektrochemische Verfahren zur Mobilisierung von Platin durch wiederholte oxidative und reduktive Behandlung platinhaltiger Abfälle sowie die Trennung der Edelmetalle von den ebenfalls wertvollen fluorierten Polymeren, für die es aktuell noch kein wirtschaftliches Verfahren zur Wiedergewinnung gibt. Auch bei der Elektrolyse forscht das ZSW im Bereich der Circular Economy. Hier geht es neben Konstruktionsfragen um Aspekte wie Elektrodenbeschichtungen und die dafür entwickelten Verfahren.

Die Beispiele des vorliegenden ZSW-Schwerpunktberichts zeigen deutlich, dass ohne technologische „Game-Changer“ eine nachhaltige Transformation von Energie- und Rohstoffkreisläufen im Sinne des Green Deal nicht möglich ist. Dazu müssen technologische Fortschritte diskutiert, Wissen ausgetauscht und Märkte erschlossen werden – damit die Zukunftsvision einer idealen Kreislaufwirtschaft bald schon Realität wird. Daran arbeiten wir.

LOOKING AHEAD

In its work on batteries, fuel cells, electrolysis and photovoltaics, to name but some of its fields of research, the ZSW covers the entire life cycle of a given product – from the selection of materials, the development of production processes, the design of prototypes geared to market requirements, the industrial roll-out and transfer to the real market right through to the recycling of the raw materials contained in the product at the end of its service life. This enables us to optimise the energy consumption and the use of raw materials back at the manufacturing stage and to bring the product design into line with a circular value chain.

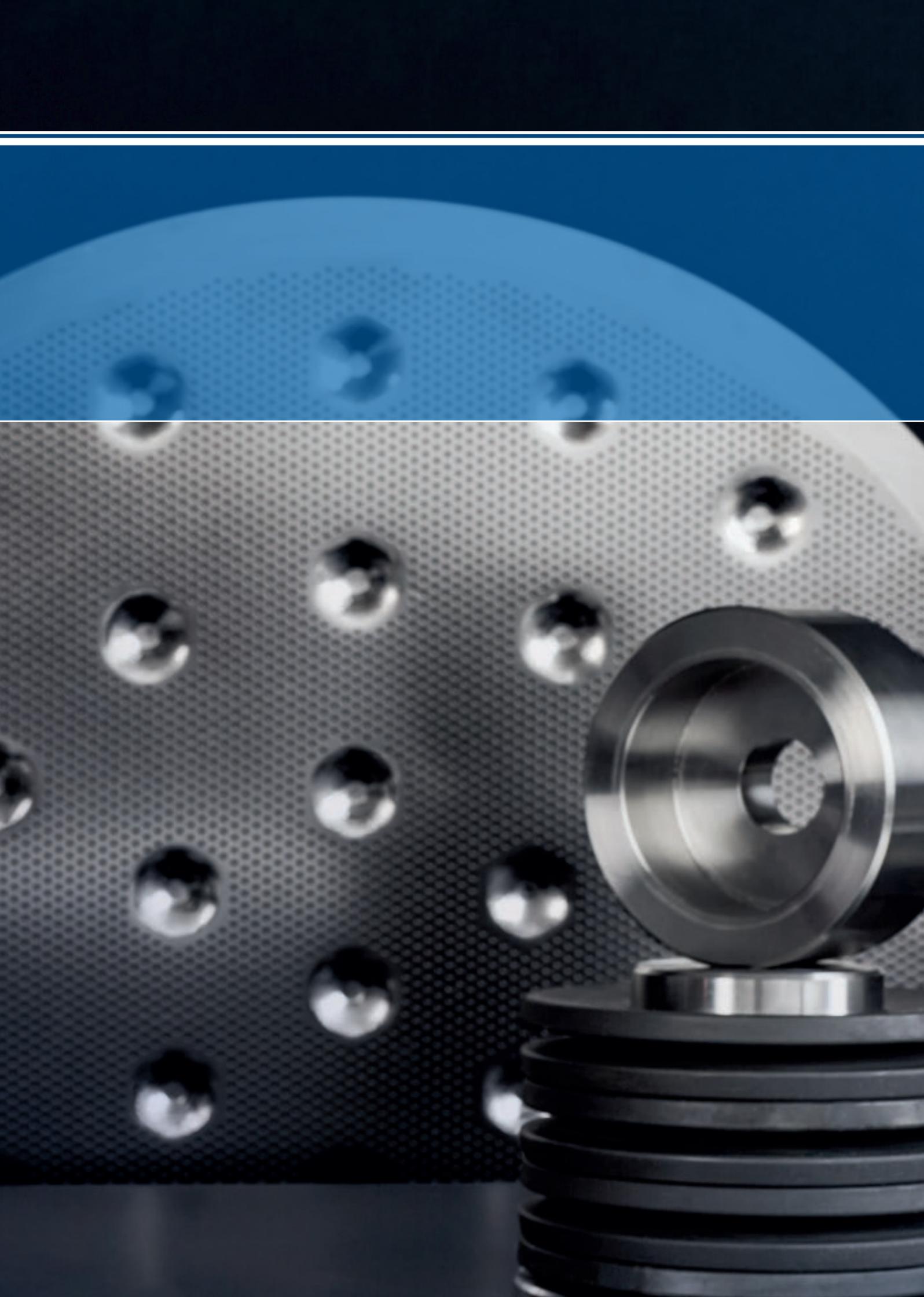
One subject of relevance in the future will be the upgrading of platinum group (PGM) metals because they are indispensable catalysts in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) and in polymer electrolyte membrane electrolyzers (PEEL). In order to minimise the environmental impact, the ZSW wants to investigate new methods for the selective dissolution of PGM. These include electrochemical processes for the mobilisation of platinum through repeated oxidation and reduction of waste containing platinum and through the separation of the precious metals from the fluorinated polymers which are also valuable and for which there is currently no economical recovery process. The ZSW is also studying the circular economy in its electrolysis research where the work revolves not only around design issues but also around aspects like electrode coatings and the processes developed for them.

The examples in this ZSW Focus Report show clearly that the sustainable transformation of energy cycles and raw material cycles envisaged in the Green Deal will not be possible without technological “game changers”. It is therefore imperative to discuss technological advances, share knowledge and open up markets – so that the future vision of an ideal circular economy will soon become reality. We are working on it.

// Fachgebiete und
Forschungsprojekte

// Departments and
Research Projects





// Systemanalyse (SYS)

Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Den Transformationsprozess unseres Energie- und Wirtschaftssystems zur Klimaneutralität auf allen Ebenen aktiv zu gestalten, ist die zentrale Aufgabe des Fachgebiets SYS. Das Team „Windenergie“ setzt dabei mit seinen Forschungen auf dem Windforschungstestfeld direkt bei der Technologie an: Ziel ist die Entwicklung und Erprobung technischer Lösungen, die die Wirtschaftlichkeit steigern. Auch die Akzeptanz für Windenergie in der Gesellschaft soll erhöht werden. Das geschieht unter anderem durch die naturschutzfachliche Begleitforschung, die den Konflikt zwischen Windenergienutzung und Artenschutz lösen will. Auf der Ebene der Daten setzt das Team „Simulation und Optimierung“ an: Mit Hilfe von Verfahren des maschinellen Lernens werden für die Energiewende relevanten Anwendungsbereichen Effizienzgewinne und Prozessoptimierungen erzielt sowie Nachhaltigkeitsziele unterstützt. Zudem werden die Methoden zur Entwicklung neuer Produkte genutzt, beispielsweise für ein technisches System zur Erkennung windenergiegefährdeter Vogelarten. Mit diesen Kompetenzen wird das Technologie-Know-how anderer Fachgebiete am ZSW hervorragend ergänzt.

Gleiches gilt für die strategische Systemanalyse. An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft werden Marktchancen bewertet, internationale Wettbewerbspositionen ausgelotet und Wertschöpfungspotenziale analysiert. An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik werden Hemmnisse untersucht und neue Instrumente entwickelt, um den Markteintritt und -hochlauf für Technologien wie grünen Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe zu unterstützen.

// Our core areas of expertise

The main brief of the SYS department is to play an active role in shaping the transformational processes for a climate-neutral economy and energy system at all levels. The “Wind Energy” team is conducting research at the wind test site, shining a direct light on the technology and aiming to develop and trial solutions which will increase economic efficiency. Another goal is to increase the acceptance of wind energy in society. One way of achieving this goal is through the accompanying research into nature conservation with the desire to resolve the conflict between the use of wind energy and the protection of wildlife. The “Simulation and Optimisation” team is busy working on the data, using machine learning methods to increase efficiency and optimise processes in applications relevant to the energy transition and to achieve sustainability goals. The techniques are also used to develop new products, such as systems designed to identify species of birds which are endangered by wind energy. These areas of expertise dovetail beautifully with the technological know-how in other departments at the ZSW.

The same applies to the strategic analysis of systems. There is a point at the interface between science and business where it is important to evaluate market opportunities, sound out the position of international competitors, and analyse the potential for added value. And there is a point at the interface between science and politics where there is a need to analyse obstacles and develop new instruments to facilitate entry to market and to support the commercial ramp-up for technologies like green hydrogen and synthetic fuels.



„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 Schwellen- und Entwicklungsländer.“

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maïke Schmidt, Head of Department
E-mail: maike.schmidt@zsw-bw.de, Phone: +49 711 7870-232

“Green hydrogen has the potential to be a “game changer” – it opens up the possibility of guiding industrialised societies to climate neutrality without any devaluation and, at the same time, it offers potential for sustainable added value and future prospects for emerging nations and developing countries.”



// Windenergietestfeld auf der Schwäbischen Alb

Als weltweit erstes Windtestfeld in bergig-komplexem Gelände soll „WINSENT“ die Zusammenarbeit der internationalen Forschungscommunity intensivieren. Das Testfeld wird gemeinsam mit den Partnern des Forschungsclusters WindForS für Forschungsaufgaben genutzt. Ziel ist es, die technische Leistungsfähigkeit von Anlagen zu verbessern und die Stromgestehungskosten zu senken. Gleichzeitig soll damit Unterstützung zur Lärmreduktion und zur Lösung des Spannungsfelds zwischen Klimaschutz und Artenschutz geleistet werden. Das vom Bundeswirtschaftsministerium und vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderte Testfeld versteht sich als offene Plattform, auf der Ideen und Laborergebnisse von Forschungseinrichtungen und Unternehmen in der Praxis erprobt werden können.

Durch die Ausstattung der Windenergieanlagen mit Messensorik – vom Fundament bis zu den Rotorblättern – werden umfangreiche Daten erfasst; viele davon erstmalig seit Beginn der Windenergienutzung. Hierdurch eröffnen sich ganz neue Dimensionen für die Optimierung von Anlagen. Der uneingeschränkte Zugriff auf die Regelungstechnik und die Konstruktionsdaten erlaubt es, das dynamische Verhalten der Windenergieanlagen zu analysieren und zielgerichtet zu optimieren. Vor und hinter jeder Anlage ist ein Windmessmast platziert, der die gesamte Rotorkreisfläche abdeckt und unterschiedliche meteorologische Parameter erfasst. Die Auswertung dieser Daten verspricht viele neue Erkenntnisse zum komplexen Zusammenspiel des meteorologischen Umfelds der Anlagen. Das Testfeld bietet somit einzigartige Möglichkeiten zur Entwicklung und unmittelbaren Erprobung neuer Technologien – sowohl für die Nutzung der Windenergie als auch für den Artenschutz.

// Wind energy test site in the Swabian Alb

“WINSENT” is the first wind test site in the world to be located in complex mountainous terrain and it is intended to strengthen collaboration in the international research community. The test site is used with the WindForS research cluster partners for research assignments. The aims are to improve the technical capability of systems and to reduce the electricity production costs. This should help with efforts to promote noise reduction and to resolve the conflict between climate action and wildlife protection. Funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, the test site sees itself as a platform open to the exploration of ideas and the practical application of results obtained in research laboratories and enterprises.

The wind turbines are fitted with measuring sensors from the base all the way up to the rotor blades in order to record extensive data – in some cases for the first time since the introduction of wind energy use. This will open up entirely new dimensions for the optimisation of systems. The unrestricted access to the control systems and the design data allows analysis and systematic optimisation of the dynamic behaviour of the wind turbines. Wind measurement masts are placed in front of and behind each turbine covering the entire surface of the rotor disc and recording various meteorological parameters. The evaluation of these data promises many new insights into the complex interaction of the meteorological environment of the systems. The test site therefore offers unique opportunities for the development and testing of new technologies – both for the use of wind energy and for the protection of wildlife.



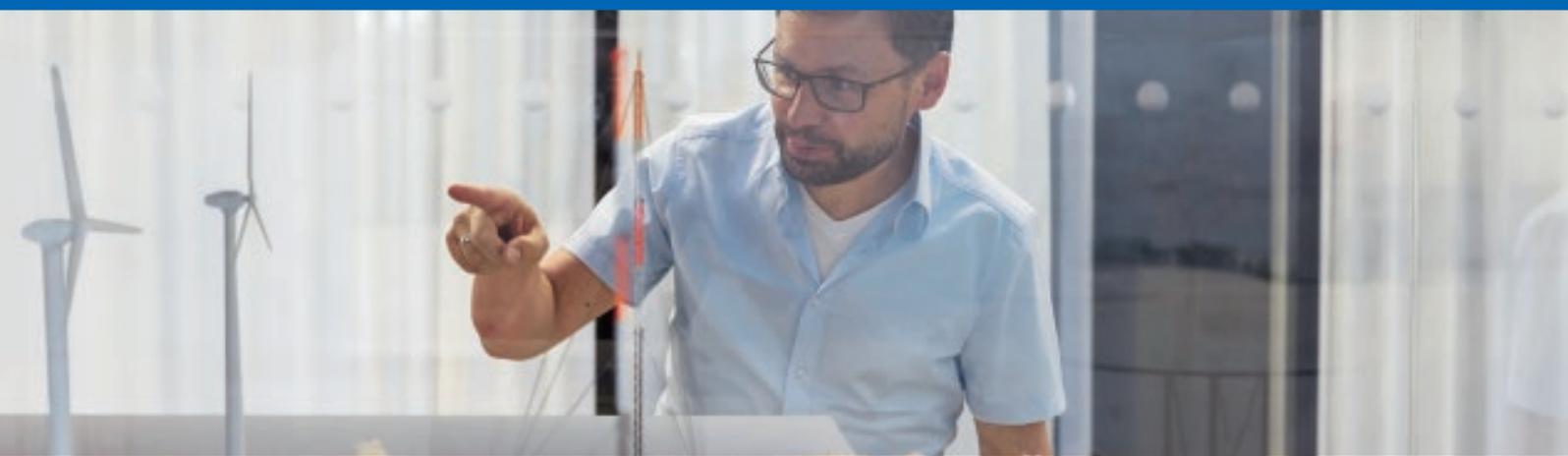
// Hightech für Artenschutz und Windenergie: der vom ZSW entwickelte BirdRecorder.

// High-tech wildlife protection and wind energy: the BirdRecorder developed by the ZSW.

// **Andreas Rettenmeier**

E-mail: andreas.reettenmeier@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-229



// Klimaneutrales Baden-Württemberg

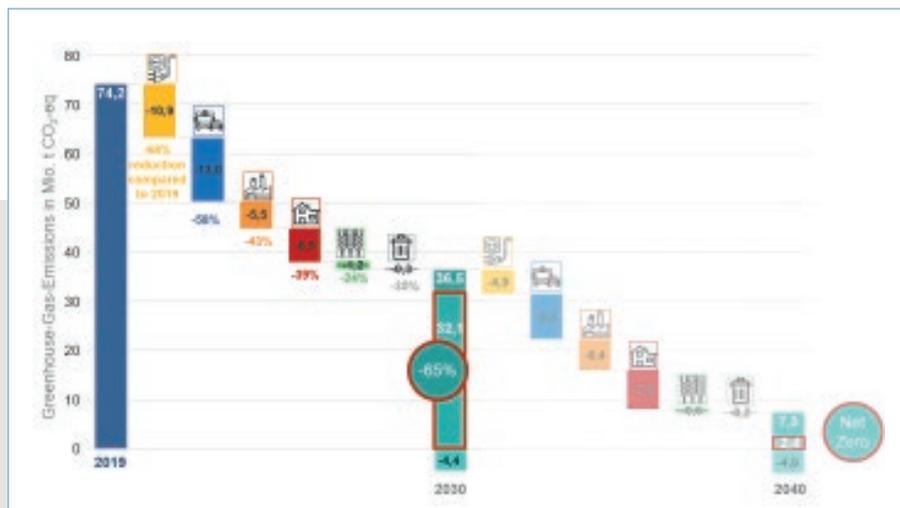
Baden-Württemberg verfolgt ehrgeizige Klimaschutzziele: Die Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 um 65 Prozent und das Erreichen der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040. Mit der Aufteilung des Minderungsziels für 2030 auf die einzelnen Sektoren erfolgt eine klare Verantwortungsübertragung. Unter der Leitung des ZSW und gefördert durch das Umweltministerium Baden-Württemberg erarbeitet ein wissenschaftliches Konsortium Wege, wie das Land innerhalb von weniger als 20 Jahren die Treibhausgasneutralität erreichen kann und welche Treibhausgasemengen die einzelnen Sektoren von der Industrie über den Verkehr bis hin zur Landwirtschaft bis 2030 einsparen müssen, um die im Klimaschutzgesetz des Landes festgelegten Ziele einhalten zu können.

Die Energiewirtschaft muss prozentual die größte Menge an Treibhausgasen reduzieren. Über den Kohleausstieg, flankiert durch massiv erhöhte Ausbauraten für Windenergie und Photovoltaik, sollen 68 Prozent gegenüber 2019 eingespart werden. Hinzu kommt ein Brennstoffwechsel von Kohle zu Erdgas, sodass Wasserstoff eingesetzt werden kann, sobald er in ausreichenden Mengen verfügbar ist. Im Verkehrssektor sollen durch Elektrifizierungs-, Verkehrsverlagerungs- und Verkehrsvermeidungsmaßnahmen rund 13 Millionen Tonnen CO₂ weniger emittiert werden. Für die Industrie geht es darum, in weniger als 20 Jahren ihre Produktion (inklusive Vorketten und Produktnutzungsphasen) treibhausgasneutral zu gestalten. Die Elektrifizierung und der Einsatz von grünem Wasserstoff sind auch hier wichtige Elemente; hinzu kommt die CO₂-Abscheidung, -Nutzung oder -Speicherung für nicht vermeidbare Prozessemissionen.

// Climate-neutral Baden-Württemberg

Baden-Württemberg is pursuing ambitious climate targets, aiming for a reduction in greenhouse gas emissions by 65 per cent by 2030 and net greenhouse gas neutrality by 2040. There is a clear allocation of responsibility to individual sectors in a bid to achieve the reduction target for 2030. A scientific research consortium headed up by the ZSW and funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment is working on ways in which the federal state can achieve greenhouse gas neutrality in less than 20 years and calculating the cutbacks in greenhouse gas quantities which will be needed by 2030 in the individual sectors, from industry and transport right through to agriculture, in order to be able to meet the goals set for the federal state in the climate change act.

The energy sector will have to reduce greenhouse gases by the largest amount in percentage terms. The phasing out of coal accompanied by the huge rate of expansion in wind energy and photovoltaics should account for savings of 68 per cent compared to 2019. In terms of fuel, the switch from coal to natural gas can also be factored in, allowing the use of hydrogen as soon as it is available in sufficient quantities. Plans for the transport sector should yield a reduction in CO₂ emissions of around 13 million tons through measures designed to promote electrification, a shift in transportation modes and a reduction in car use. As far as industry is concerned, the aim is to make production processes (including upstream chains and product usage phases) greenhouse gas-neutral in less than 20 years. Electrification and the use of green hydrogen are key elements in this sector as well, alongside CO₂ capture, use and storage for unavoidable process emissions.



// Die Energiewirtschaft muss prozentual die größte Menge an Treibhausgasen reduzieren.

// The energy sector will have to reduce greenhouse gases by the largest amount in percentage terms.

//Tobias Kelm

E-mail: tobias.kelm@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-250



// KI-gestützte Batterieherstellung

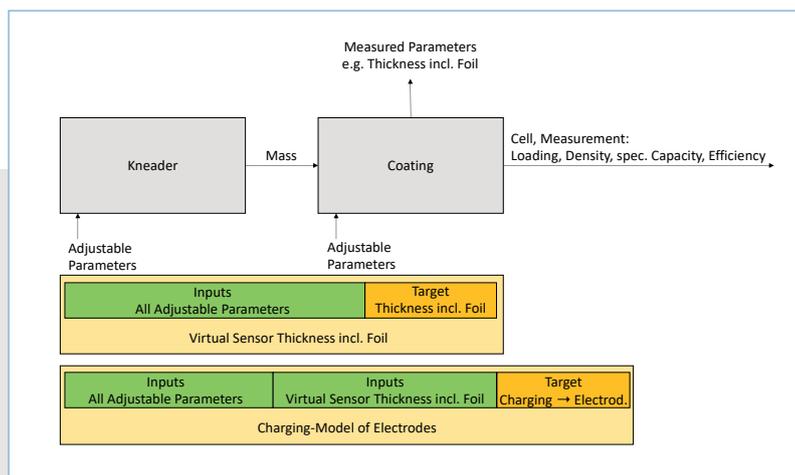
In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „KontEIPro“ arbeitet das ZSW daran, die Batterieherstellung mittels künstlicher Intelligenz (KI) zu optimieren. Ziel ist es, vor allem Verfahren zur Produktion von Batterieelektroden umweltfreundlich, lösungsmittelfrei und wirtschaftlich zu gestalten. Der Projektname „KontEIPro“ steht dabei für „Kontinuierliche Elektrodenproduktion“. Durch KI-gestützte Methoden lassen sich neue Erkenntnisse gewinnen, die gemeinsam mit den ExpertInnen für Batterieforschung angewandt werden. Im Rahmen des Forschungsclusters „Intelligente Zellproduktion“ (InZePro) unterstützt das ZSW unter anderem das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) in Bremen dabei, den Mischprozess des Kathodengranulats – bestehend aus Aktivmaterial, Kohlenstoff und Binder – zu verbessern. Durch die KI-gestützte Prozessleittechnik werden zusätzlich Zeit, Energie und Kosten eingespart.

Sowohl beim Kneten als auch bei der Beschichtung der Elektroden selbst gibt es einstellbare Parameter, die vor Prozessbeginn gewählt werden können. Zudem gibt es Messwerte, die erst während des Prozesses erhoben werden. Um eine effektive Modellierung der Zielgrößen zu erreichen, werden sowohl für den Kneten als auch für die Beschichtung virtuelle Sensoren verwendet. Trainiert wurden diese virtuellen Sensoren mit Messwerten wie beispielsweise Dicke, Masse und Widerstand, die während der Experimente anfallen. Die KI-gestützte Vorhersage der Produktionsergebnisse hilft den ExpertInnen bei der Einordnung ihrer aktuellen Forschung und später in der automatisierten Qualitätssicherung, wenn es um die industriennahe Herstellung im großen Maßstab geht.

// AI-assisted battery manufacture

The ZSW is working on optimising battery production through the use of artificial intelligence (AI) in the “KontEIPro” project which is funded by the Federal Ministry of Education and Research. The main aim is to develop processes for the production of battery electrodes which are eco-friendly, solvent-free and economical. The project name “KontEIPro” stands for “continuous electrode production”. The new insights which emerge through AI-assisted methods are applied with experts in battery research. Within the context of the “Intelligent Battery Cell Production” research cluster (InZePro), the ZSW is working on improving the process of mixing the cathode pellets – consisting of active material, carbon and binder – with a view to assisting various research institutions, including the Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials (IFAM) in Bremen. The AI-powered process control technology also saves time, energy and costs.

There are adjustable parameters for both the kneading machine and the coating of the electrodes, and these parameters can be selected before the start of the process. There are also measurements which are only collected during the process. Virtual sensors are used both for the kneading machine and for the coating in order to arrive at an effective way of modelling the target variables. These virtual sensors are taught in with thickness, mass and resistance values, for example, as measured during the experiments. The AI-assisted prediction of the production results helps the experts as they integrate it into their current research and later into the automated quality control when it comes to large-scale production equivalent to factory conditions.



// Modellierung der Abbildung auf die Parameter Dicke, Masse und Widerstand.

// Modelling of target parameters for thickness, mass and resistance.

// Nico Klar

E-mail: nico.klar@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-337

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

// Unsere Kernkompetenzen

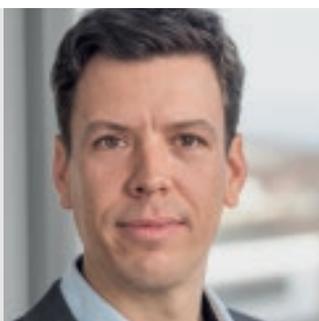
Um den Ausbau der Photovoltaik (PV) zu beschleunigen, arbeitet das ZSW an Materialien und Fertigungsverfahren für die nächste Generation von Solarmodulen. Der Fokus liegt dabei auf Lichtabsorbieren aus metallorganischen Perowskiten und Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (kurz CIGS). Diese Dünnschichttechnologien 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 Tandem-Solarzellen, 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 × 30 cm² weitgehend mit Durchlaufprozessen, und damit 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 Dünnschichtsolarmodulen 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 solar cells in a bid to accelerate the expansion of photovoltaics (PV). The focus is on light absorbers made of organometallic perovskites and copper indium gallium selenide (CIGS for short). 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 light and flexible films as carrier materials. It is also possible to achieve efficiency levels above the limit of conventional 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 cell surfaces in the pilot plant. It is then possible to develop and manufacture modules measuring up to 30 × 30 cm², mainly using continuous processes 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 or metal foil, roll-to-roll processes for thin-film modules up to 30 cm wide and of any length are developed. These can be used outdoors, on rooftops and as integrated photovoltaics in vehicles and on buildings. Drawing on its extensive experience in thin-film solar modules, the department carries out a wide range of process engineering and material analysis jobs for customers.



„Photovoltaik ist aktiver Klimaschutz. Darum unterstützen wir unsere Partner bei der kostengünstigen Herstellung flexibler, leichter und hocheffizienter Dünnschichtsolarmodule.“

// Dr. Jan-Philipp Becker, Head of Department
E-mail: jan-philipp.becker@zsw-bw.de, Phone: +49 711 7870-282

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



// Industrialisierung flexibler Perowskit-Solarzellen

In Kooperation mit einem Solarmodulhersteller geht das ZSW einen ersten Schritt in Richtung industrieller Fertigung von Perowskit-Solarzellen auf Folie. Perowskit-Solarzellen basieren auf Verbindungen aus der Gruppe der metallorganischen Perowskite. Diese zeigen hervorragende optische und elektronische Eigenschaften. Sie sind in großen Mengen und kostengünstig auf der Erde verfügbar. Bei den Solarzellen wurden bis auf den Front- und Rückkontakt alle Funktionsschichten mittels eines Front- zu-Rücktauglichen Schlitzdüsenverfahrens, also vakuumfrei, abgedruckt. Auch die Vorschubgeschwindigkeit von 1,2 m/min liegt bereits im produktionsrelevanten Bereich. Das Schlitzdüsenverfahren zeichnet sich durch besonders geringe Materialverluste und eine ausgezeichnete Skalierbarkeit aus. Der im Projektverlauf erzielte Wirkungsgrad von 14 Prozent stellt unter den genannten Abscheidebedingungen einen Rekord dar, bietet jedoch nach weiterer Optimierung der Einzelschritte noch viel Spielraum nach oben.

Es ist vorgesehen, die hochflexiblen Solarzellen in Glasröhren mit ca. 2,5 cm Außendurchmesser einzuführen und hermetisch zu versiegeln. Anschließend werden die Röhren parallel und in definiertem Abstand zueinander zu Röhrenmodulen verschaltet. Solche Röhrenmodule eignen sich insbesondere zur Teilverschattung zum Beispiel von landwirtschaftlich genutzten Flächen (Agri-Photovoltaik) oder von begrünten Dächern und anderen Gebäudeteilen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf derselben Fläche. Die ForscherInnen bereiten die Hochskalierung und Massenfertigung beim Industriepartner vor.

// Industrial production of flexible perovskite solar cells

Having teamed up with a solar module manufacturer, the ZSW is taking its first steps towards the industrial production of perovskite solar cells on film. Perovskite solar cells are based on compounds from the group of organometallic perovskites. These boast excellent optical and electronic properties. There is a plentiful and inexpensive supply of them on the earth. With the exception of the front and rear contacts, all the functional layers of the solar cells are deposited using a slot die (vacuum-free) coating method suitable for roll-to-roll processes. The feed rate of 1.2 m/min is already in the relevant range for production processes. The slot die process boasts exceedingly low material wastage and excellent scalability. The efficiency of 14 per cent achieved in the course of the project is actually a record under the aforementioned deposition conditions but still offers plenty of room for improvement after further optimisation of the individual steps.

There are plans to insert the highly flexible solar cells into glass tubes with an outer diameter of around 2.5 cm and to seal them hermetically. These will then be connected in parallel and at a defined distance from one another to form tube modules. These are particularly suitable for the provision of shade in areas on agricultural land (agri-photovoltaics) or on roof gardens, for example, and other parts of buildings with simultaneous power generation on the same area. The research scientists are preparing to scale up the system for mass production at the industrial partner.



// Blick ins ZSW-Labor für flexible Solarzellen.
// Inside the ZSW laboratory for flexible solar cells.

// Dr. Jonas Hanisch
E-mail: jonas.hanisch@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-234



// Die Simulationsplattform TwinPV

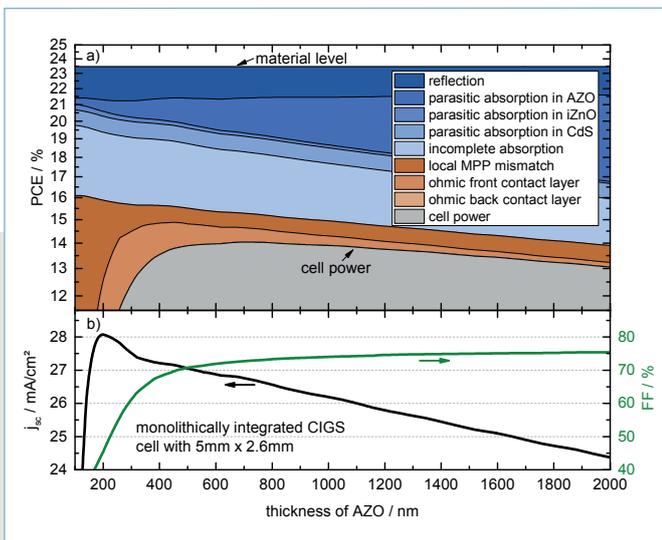
Lohnt es sich, Solarmodule für ihren ganz konkreten Standort zu optimieren? Wo sollten Aufwände für Entwicklungsarbeit am effektivsten fokussiert werden? Wie wirkt es sich aus, wenn ein Material im Solarzellen-Schichtstapel durch ein anderes ersetzt wird? Diese Fragen lassen sich sehr gut mit Hilfe von Simulationsrechnungen beantworten. Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekts „CIGSTheoMax“ wurde am ZSW die Softwareplattform TwinPV entwickelt, die durch den generischen Aufbau digitale Abbilder verschiedener Dünnschichtsolarmodule erzeugen kann. Die besondere Architektur ermöglicht die getrennte Betrachtung optischer und elektrischer Effekte, die Simulation des Diodenverhaltens und die Optimierung des Kontaktdesigns der Solarzelle oder des Moduls.

Auch Ertragsberechnungen je nach Standort und Montagewinkel sind möglich. Somit lassen sich Auswirkungen von Anpassungen, beispielsweise am Moduldesign, nicht nur unter genormten Standardtestbedingungen berechnen. Da Solarmodule in mittleren Breitengraden häufig geringeren Beleuchtungsintensitäten ausgesetzt sind, könnte beispielsweise die Dicke der transparenten Kontaktschicht reduziert werden, was Materialkosten einspart und geringere optische Verluste ermöglicht. Im Optimierungsverfahren werden alle Parameter aufeinander abgestimmt. Die in der Software generierten Verlustanalysen zeigen eingängig, wo Verbesserungspotenziale vorhanden sind. Mit TwinPV werden auch die Entwicklungsaktivitäten von Projektpartnern und Kunden des ZSW begleitet.

// TwinPV simulation platform

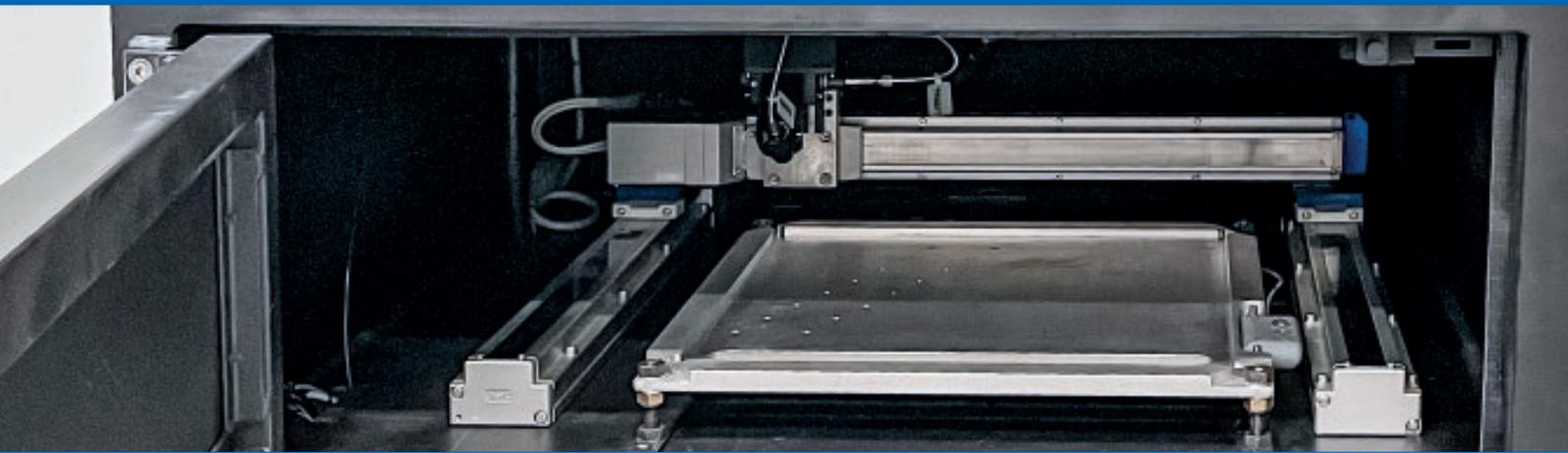
Is it worth optimising solar cells to the specification required for your location? Where should development input be concentrated for maximum impact? What is the effect of replacing one material in the solar cell stack with another? These questions can be answered very easily with the help of computer simulations. The "CIGSTheoMax" project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action saw the development at the ZSW of the TwinPV software platform which can generate digital images of various thin-film solar cells and modules thanks to its generic structure. The special architecture enables the separate observation of optical and electrical effects, the simulation of the diode behaviour, and the optimisation of the design of the solar cell or module contacts.

Yield calculations are also possible depending on location and angle of installation. This means that it is possible to calculate the effects of modifications – to the module design, for example – and not only under standard test conditions. Solar modules in middle latitudes are often exposed to lower levels of lighting intensity therefore the thickness of the transparent contact layer could be reduced, for example, thereby saving on material costs and enabling lower optical losses. All the parameters are balanced with each other in the optimisation process. The loss analyses generated in the software clearly show where there is potential for improvement. TwinPV is also conducive to support for the development work of project partners and customers of the ZSW.



// Auswirkung der Dicke des transparenten Frontkontakts (hier Aluminium-dotiertes Zinkoxid (AZO)) in einem CIGS-Solarmodul mit dazugehöriger Verlustanalyse.
 // Effect of the thickness of the transparent front contact (in this case aluminium-doped zinc oxide (AZO)) in a CIGS solar module including loss analysis.

// Dr. Theresa Magorian Friedlmeier
 E-mail: theresa.friedlmeier@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-293

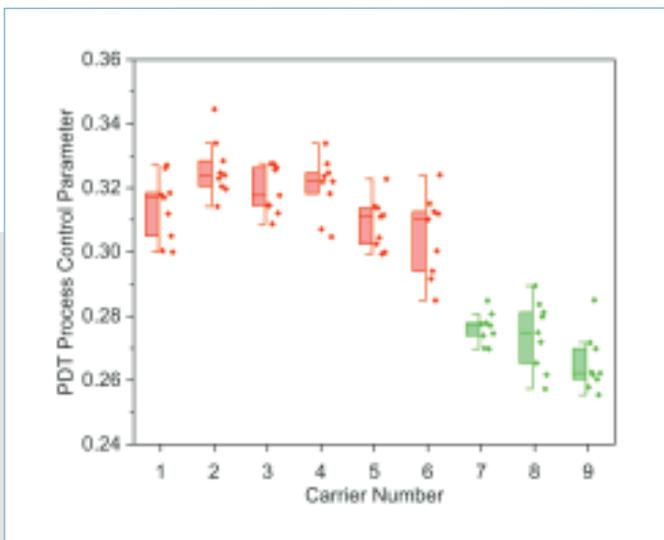


// Bessere Prozesskontrolle für die Solarzellenproduktion

In den vergangenen Jahren hat sich eine nachträgliche Behandlung von CIGS-Halbleiterschichten mit Alkali-Elementen wie Rubidium, das sogenannte Post-Deposition Treatment (PDT), als entscheidend für Wirkungsgradsteigerungen von CIGS-Dünnschicht-solarzellen und -modulen erwiesen. Der Nachweis eines erfolgreichen PDT-Prozesses unter Produktionsbedingungen war bisher aber schwierig. Zusammen mit dem spanischen Forschungsinstitut IREC und einem Messgeräteentwickler wurde dieses Thema im europäischen SolarEra.net-Projekt „In₄CIS“ adressiert, das 2022 erfolgreich abgeschlossen wurde. In enger Kooperation zwischen Probenherstellung und Analytik konnte zunächst eine Abhängigkeit zwischen den PDT-Prozessparametern, den Spektren in Raman- und Photolumineszenz (PL)-Messungen und der elektro-optischen Qualität der Solarzellen identifiziert werden. Basierend hierauf wurde ein neuartiger Messkopf aufgebaut, welcher simultane optische Raman- und PL-Messungen an einer Position auf einer Probe ermöglicht. Dieser wird in einem Mapping-System über Proben bis zu einer Fläche von 30 x 30 cm² gerastert. Das System ist nun an der Inline-Beschichtungsanlage des ZSW für CIGS im Einsatz. Durch eine geeignete Wahl der Messgeometrie kann so in industriekompatibler Zeit von wenigen Minuten eine Probe auf eine erfolgreiche PDT-Prozessierung geprüft werden.

// Better process control for solar cell production

In recent years, the subsequent treatment of CIGS semiconductor layers with alkali elements like rubidium, known as post-deposition treatment (PDT), has proven to be crucial for increasing the efficiency of CIGS thin-film solar cells and modules. It has been difficult until now, however, to provide proof of a successful PDT process under production conditions. Together with the Spanish research institute IREC and a measuring device developer, this subject was addressed in the European SOLAR-ERA.NET project "In₄CIS" which was successfully completed in 2022. In close cooperation between sample preparation and analysis, it was initially possible to identify a dependency between the PDT process parameters, the spectra in Raman and photoluminescence measurements (PL), and the electro-optical quality of the solar cells. This served as a basis for the development of a new type of measuring head which enables simultaneous optical Raman and PL measurements at a given position on a sample. This is rasterised in a mapping system over samples up to an area of 30 x 30 cm². The system is now in use at the ZSW in-line coating system for CIGS. The selection of suitable measurement geometry allows a sample to be checked for successful PDT processing in just a few minutes, making the system compatible with industry requirements.



// Änderung des PDT-Prozesskontrollparameters, gemessen mit dem neu entwickelten System auf neun aufeinanderfolgenden 30 x 30 cm² großen Proben, bei denen die letzten drei unter optimalen Bedingungen hergestellt wurden.

// Change in PDT process control parameter measured with the newly developed system on nine consecutive 30 x 30 cm² samples, whereby the last three were produced under optimum conditions.

// Dr. Stefan Paetel

E-mail: stefan.paetel@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-237

// Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)

// Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung der Qualität und Zuverlässigkeit von Photovoltaik (PV)-Modulen sowie der effiziente Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder des Fachgebiets. Mit jahrzehntelanger Erfahrung werden im Testlabor Solab und auf dem Freiland-Testfeld Widderstall PV-Module und -Systeme hinsichtlich Energieertrag und Langzeitstabilität untersucht. Ein wichtiger Bestandteil ist die Bewertung der Qualität von bestehenden Solarparks durch detaillierte Alterungsuntersuchungen von Modulstichproben. Die entwickelten Methoden fließen bei der Mitarbeit in Normungsgremien ein.

Der Bedarf an schadensanalytischen Untersuchungen von PV-Modulen aus Solarparks nimmt deutlich zu. Qualitätsprobleme mit polymerbasierten Modulrückseiten bilden dabei einen Schwerpunkt. Auf der Planungsseite von PV-Projekten berät das ZSW in puncto Ertragsberechnung, Optimierung und Qualitätssicherung, wobei der Anteil von bifazialen Modulen in den PV-Systemen zunimmt.

Photovoltaiksysteme tragen wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung im Energiesystem bei. Das Fachgebiet MSA analysiert daher entsprechende Potenziale und entwickelt Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten einschließlich geeignetem Lademanagement für die Elektromobilität. Damit werden Kunden bei der Entwicklung und Anwendung entsprechender Algorithmen für den Netzbetrieb und den Energiemarkt unterstützt und Industrie und Handwerk auf dem Weg zur Klimaneutralität ihrer Dienstleistungen und Produkte beraten.

// Our core areas of expertise

The two main subjects of concern for the department are ensuring the quality and reliability of photovoltaic (PV) modules and facilitating the efficient use of solar power in the energy system. Decades of experience come into play in studying the energy yield and long-term stability of PV modules and PV systems in the Solab test laboratory and on the Widderstall outdoor test site. One key focus is the assessment of the quality of existing solar parks through a detailed analysis of the ageing of random module samples. The methods which have been developed are incorporated in the input in standardisation bodies.

There is a significant increase in the need for analysis of PV modules from solar parks with a view to diagnosing damage and failure. Quality problems with polymer-based rears are a priority. The ZSW has a consultancy role in PV projects on the planning side, providing advice on yield calculation, optimisation and quality control, duly noting an increase in the proportion of bifacial modules in PV systems.

Photovoltaic systems make a significant contribution to sustainable power supply in the energy system. The MSA department therefore analyses the relevant potential and develops algorithms for the optimised operation of generators, storage facilities and supplies, including the management of suitable charging systems for electric vehicles. This is beneficial for customers, helping them with the development and application of appropriate algorithms for grid operation and the energy market, and it is supportive of industry and trade, advising them on the route to climate neutrality in relation to their services and products.



„Nachhaltige Energieversorgung mit Photovoltaik schafft Unabhängigkeit – wir bewerten die Zuverlässigkeit und entwickeln effiziente Systeme für die Nutzung erneuerbarer Energien.“

// Dr.-Ing. Jann Binder, Head of Department
E-mail: jann.binder@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-209

"A sustainable energy supply with photovoltaics allows independence – we evaluate the reliability and develop efficient systems for the use of renewable sources of energy."



// Solar-Testfeld Widderstall

Das Solar-Testfeld des ZSW wird seit 1989 für Langzeitstudien von PV-Modulen und Systemen mit verschiedenen PV-Absorber-Materialien unter realen Einstrahlungs- und Witterungsbedingungen genutzt. Die daraus gewonnenen Daten ermöglichen gezielte Untersuchungen der Modul- und Systemperformance sowie von Degradations- und Alterungsmechanismen. Rückkopplungen der Felddaten mit Resultaten von Labor- und standardisierten Qualitätstests im ZSW-eigenen Testlabor Solab erlauben ein schrittweises Angleichen der Labortestverfahren an reale Bedingungen.

Ein besonderes Tool stellt der Dreifach-Spiegelkonzentrator mit zweiachsiger Nachführungseinrichtung sowie Rückseitenkühlung über Ventilatoren dar. Damit lassen sich beschleunigte Alterungstests unter realen Einstrahlungsbedingungen durchführen. Es entsteht eine dreifach konzentrierte Einstrahlung mit rund 3.700 kWh/m²/a und besonders hoher Verweildauer bei hohen Einstrahlungswerten.

Aktuell wurde der Dreifach-Spiegelkonzentrator für Untersuchungen von Modul-Rückseitenfolien eingesetzt, um das Degradationsverhalten kritischer Folienmaterialien zu untersuchen sowie deren Resultate mit Labortests zu korrelieren. Die Installation des Moduls auf dem Konzentrator mit der Rückseitenfolie in Richtung Sonne ermöglicht eine um den Faktor 15 erhöhte Dosis an UV-Strahlung gegenüber der normalen Installation im Feld. Mit Hilfe des Konzentrators konnte die Beständigkeit eines Moduls mit reparierter Rückseitenfolie gezeigt werden. Die vorhandenen Risse wurden durch eine Beschichtung verfüllt, die der dreifach konzentrierten Einstrahlung während eines Jahres standgehalten hat. Der Dreifach-Spiegelkonzentrator eignet sich auch für beschleunigte Alterungstests von großflächigen PV-Modulen der neuesten Technologien.

// Widderstall solar test site

The ZSW solar test site has been used since 1989 for long-term studies on PV modules and systems with different PV absorber materials under real irradiation and weather conditions. The data obtained from these studies enables targeted analysis of module and system performance and of degradation and ageing mechanisms. Linking the field data back to results from laboratory tests and standardised quality tests in the ZSW Solab test laboratory makes it possible to adapt the laboratory test procedures and gradually bring them into line with real conditions.

One special tool is the triple mirror concentrator with dual-axis tracker and rear panel fan-assisted cooling. This allows accelerated ageing tests to be carried out under real irradiation conditions. The irradiation is tripled in concentration at around 3,700 kWh/m²/a and with a particularly long exposure time at high irradiation levels.

The triple mirror concentrator was recently used for the examination of backsheets on modules in order to analyse the degradation behaviour of critical film materials and to correlate the results with laboratory tests. Installing the module on the concentrator with the backsheet facing the sun enables a 15-fold increase in the dose of UV radiation compared with normal site installation. It was possible with the help of the concentrator to demonstrate the durability of a module with a repaired backsheet. The cracks were filled with a coating which withstood the triple concentration of irradiation for a year. The triple mirror concentrator is also suitable for accelerated ageing tests on state-of-the-art PV modules with large surface areas.



// Untersuchung der Beständigkeit einer reparierten Modul-Rückseitenfolie unter konzentrierter Einstrahlung auf dem Solar-Testfeld Widderstall.

// Investigation of the durability of a repaired module backsheet under concentrated irradiation on the Widderstall solar test site.

// Roland Einhaus

E-mail: roland.einhaus@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-254



// Unternehmen auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit begleiten

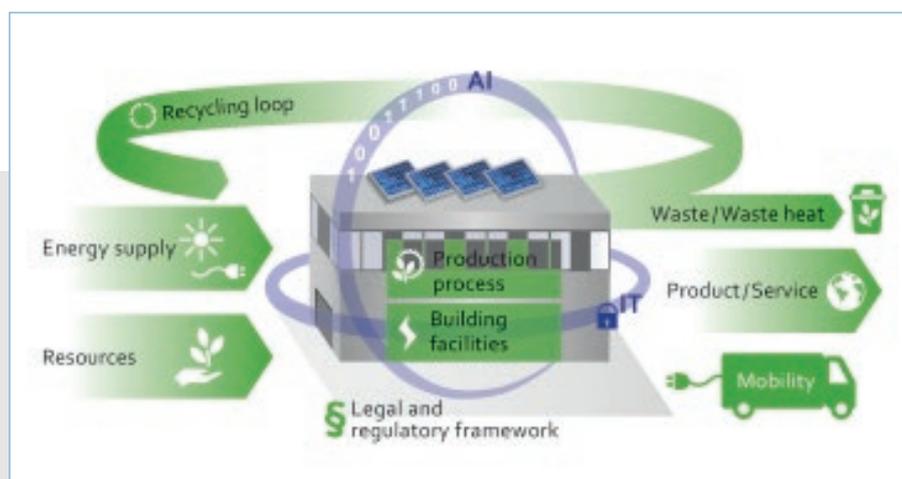
Nachhaltiges Handeln ist zunehmend ein Wettbewerbsfaktor für Industrie und Gewerbe in der Konkurrenz um finanzielle Ressourcen, Rohstoffe, Arbeitskräfte, Kunden und Aufträge. Diese Herausforderung aktiv anzugehen ist das Ziel des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Zentrums „Klima.Neutral.Digital“. Darin erarbeitet das ZSW zusammen mit Partnern ein attraktives Angebot für kleine und mittlere Unternehmen, um diese in die Lage zu versetzen, den Weg zu mehr Nachhaltigkeit und zur Klimaneutralität zu gehen. Der Fokus liegt auf digitalen Werkzeugen und KI-Methoden, die geeignet sind, Energie- und Stoffströme in der Beschaffung, im Produktentstehungsprozess, bei der Nutzung und durch Wiederverwertung transparent zu machen, zu optimieren, zu reduzieren oder zu ersetzen.

Für Unternehmen werden wichtige Basisinformationen und Nachhaltigkeitsanforderungen aufbereitet. Mit ihrem technischen Know-how, Quick-Checks und selbst entwickelten Werkzeugen unterstützen die Projektpartner die Unternehmen auch bei der Planung und Umsetzung von konkreten Projekten und Zertifizierungen. Dabei stellen sie dem Unternehmen vor Ort je nach individuellem Bedarf Klima-Coaches und KI-TrainerInnen zur Seite, die auf die aktuellen Herausforderungen des Unternehmens eingehen. Zunächst bestimmen die ExpertInnen gemeinsam mit dem Unternehmen den Status quo. Anschließend werden ressourcenschonende Prozesse und Dienstleistungen entlang eines Aktionsplans entwickelt.

// Accompanying enterprises on their way to greater sustainability

Sustainable business practice is increasingly a competitive factor for industry and trade in the contest for financial resources, raw materials, workers, customers and orders. Actively tackling this challenge is the goal of the "Klima.Neutral.Digital" centre funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. The ZSW is working in partnership in this context on the development of an attractive package for small and medium-sized companies with a view to enabling them to find and follow the pathway to greater sustainability and climate neutrality. The focus is on digital tools and AI methods which are designed to highlight, optimise, reduce or replace energy and material usage in procurement, in product development processes, in applications and through recycling.

Important basic information and key sustainability requirements are prepared for enterprises. With their technical know-how, quick checks and in-house tools, the project partners also help the enterprises with the planning and implementation processes in connection with specific projects and certification procedures. Depending on individual needs, they send in climate coaches and AI trainers who look at the current challenges faced by the enterprise in any given case. The experts start by identifying the existing state of affairs in consultation with the enterprise. An action plan is then drawn up with a view to introducing resource-efficient processes and services.



// Energie und Stoffströme als Einflussfaktoren für Nachhaltigkeit im Unternehmen. Die Digitalisierung dient als Wegbereiterin für den Transformationsprozess.
 // Energy and material usage as factors influencing sustainability in companies where digitisation is paving the way for the transformation process.

// Ruben Rongstock
 E-mail: ruben.rongstock@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-356

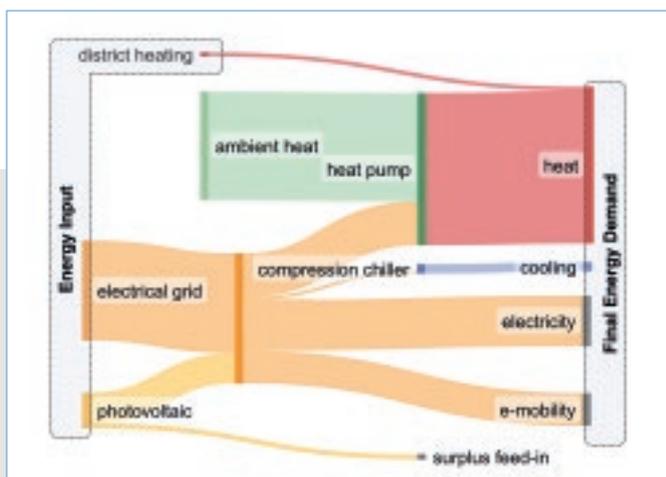


// Klimaneutrale Energieversorgungssysteme für Unternehmen

Das Thema klimaneutrale Energieversorgung aktiv anzugehen und als Chance für die Wirtschaft zu nutzen, wird nicht nur durch den Klimawandel, sondern auch aufgrund der akuten Energiekrise immer dringlicher. Neben den großen Herausforderungen, die solche Transformationsprozesse darstellen, bietet sich für Unternehmen jedoch auch die Chance, sich frühzeitig für die Zukunft aufzustellen und somit Wettbewerbsvorteile zu generieren.

Mit Hilfe von Energiesystemsimulationen für Unternehmen stellt das ZSW Transformationsszenarien hin zur Klimaneutralität für die Bereiche Elektrizität, Wärme, Kälte und Mobilität auf. Berücksichtigt werden dabei unter anderem Potenziale für den Ausbau von Photovoltaik, die Umstellung von fossil betriebenen Wärmeerzeugern auf elektrische Wärmepumpen sowie die Substitution von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren durch batterieelektrische Fahrzeuge. Durch (viertel-)stündlich aufgelöste Simulationen werden zudem die Vorteile von Flexibilität aus Wärme- und Stromspeichern berücksichtigt. Um die zu erwartenden Kosten und CO₂-Reduktionen abschätzen zu können, werden den Simulationen Erkenntnisse zu Markt- und Preisentwicklungen aus wissenschaftlich fundierten Studien zugrunde gelegt.

Die Grafik zeigt das Zielsystem der nachhaltigen Energiebereitstellung (Energy Input) und -nutzung (Final Energy Demand) am Beispiel eines Industriequartiers. Die Breite der dargestellten Energieströme ist proportional zur Jahresenergie. Durch die Nutzung von Elektrizität aus erneuerbaren Energien und die Sektorkopplung über die Wärmepumpe verbleiben sehr geringe CO₂-Emissionen. Diese können über die Einspeisung von Überschussstrom aus lokaler PV kompensiert werden.



// Climate-neutral energy supply systems for enterprises

It is becoming increasingly urgent to take action and tackle the issue of climate-neutral energy supply and to use it as an opportunity for the economy, not only because of climate change, but also because of the acute energy crisis. In addition to the major challenges posed by such transformation processes, there are also chances for enterprises to take an early lead, however, and to gain a competitive edge for the future.

The ZSW uses energy system simulations to generate transformation scenarios in order to steer enterprises towards climate neutrality in electricity, heating, refrigeration and mobility. Many factors are taken into consideration in this process, including potential for the expansion of photovoltaics, conversion from heat generated by fossil fuels to electric heat pumps, and replacement of vehicles with combustion engines with battery electric vehicles. The advantages of flexibility from heat and power storage are also taken into account by means of (quarter) hourly simulations. In order to be able to estimate the expected costs and CO₂ reductions, the simulations are based on sound scientific research findings on market and price trends.

The diagram below takes an industrial district as an example to show the target system of sustainable energy supply (energy input) and use (final energy demand). The breadth of energy usage shown is proportional to the annual energy. The remaining CO₂ emissions are very low due to the use of electricity from renewable sources of energy and sector coupling through the heat pump. These emissions can be offset by feeding in surplus electricity from local PV systems.

// Zielsystem der nachhaltigen Energiebereitstellung (Energy Input) und -nutzung (Final Energy Demand) am Beispiel eines Industriequartiers (Erläuterung s. Text).

// Target system of sustainable energy supply (energy input) and use (final energy demand) based on the example of an industrial district (see article for explanation).

// Jonas Petzschmann

E-mail: jonas.petzschmann@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-160

// Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)

Renewable Fuels and Processes (REG)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet REG entwickelt anwendungsnah Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff und regenerativen Kraftstoffen im Kontext von Power-to-X (eFuels). Im Bereich Circular Economy geht es um Verfahren im Bereich Phosphorrückgewinnung und rohstoffliches Recycling von Kunststoffabfällen.

Im ZSW-Technikum entstehen Technologiebausteine für die Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen, die im technischen Maßstab umgesetzt und erprobt werden. Unser Fokus liegt dabei auf serientauglichen und skalierbaren Materialien und Fertigungsmethoden für alkalische Elektrolyseure. Das Fachgebiet verfügt über eigene Elektrolyseblock- und Systemtechnologien bis in den MW-Maßstab. Industriekunden stehen vielfältige Testmöglichkeiten zur Verfügung – sowohl in den ZSW-eigenen Laboren (ElyLab) als auch in Realumgebung, so beispielsweise auf der ZSW-Forschungsplattform am Power-to-Hydrogen-Standort in Grenzach-Wyhlen.

Als weiteres Kernelement für die Herstellung von eFuels werden Verfahren zur effizienten regenerativen CO₂-Bereitstellung aus Luft oder biogenen Reststoffen entwickelt. Im Bereich von Syntheseprozessen für Methan oder Methanol verfügen die Forschenden über langjährige Erfahrungen. Am ZSW wurden bereits mehrere eigene Elektrolyse- und Power-to-X-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 25 kWel und 1 MWel errichtet und betrieben. Die Beratungsleistung für Industriekunden reicht vom Basic Engineering über die Inbetriebsetzung kommerzieller Anlagen bis zum anschließenden Technologiemonitoring. Das gilt gleichermaßen für Verfahren zum Recycling von Phosphor und zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen.

// Our core areas of expertise

The REG department develops technologies with practical applications in mind for the production of hydrogen and renewable fuels in the power-to-X context (e-fuels). The circular economy is one area involving the in phosphorus recovery and the recycling of plastic waste in raw material form.

Technology modules for the production of hydrogen and synthetic fuels are developed in the ZSW pilot plant and are put into practice and tested on an industrial scale. Our focus is on reproducible and scalable materials and manufacturing methods for alkaline electrolyzers. The department has its own MW-scale electrolysis stack and electrolysis system technologies. Industrial customers have access to a wide range of test facilities – both in the ZSW laboratories (ElyLab) and in real-world environments, such as the setting provided at the ZSW research platform at the power-to-hydrogen site in Grenzach-Wyhlen.

Processes are being developed for the provision of an efficient renewable supply of CO₂ from air or biogenic residues by way of a further core element for the production of e-fuels. The research scientists have many years of experience in synthesis processes for methane or methanol. Several in-house electrolysis and power-to-X systems with output ranging between 25 kWel and 1 MWel have already been installed at the ZSW and are operated there. Industrial customers are advised on issues ranging from basic engineering jobs and commissioning of commercial units right through to technical input in the follow-up monitoring of systems. This applies equally to processes for the recycling of phosphorus and for the recovery of plastic waste for use as raw materials.



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

// Dr. Marc-Simon Löffler, Head of Department
E-mail: marc-simon.loeffler@zsw-bw.de, Phone: +49 711 7870-233

“Our in-house developments and test facilities are allowing us to work with industry on electrolysis and e-fuels and accelerate the routes to market for these technologies of the future.”



// Elektrolyse made in Baden-Württemberg

Ziel des vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Verbundprojekts „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“ ist es, die Wettbewerbsfähigkeit der hiesigen Unternehmen im Bereich Elektrolyse zu stärken und die Industrialisierung der Systemtechnik voranzutreiben. Am ZSW wurde dafür ein Elektrolyseur in der 1-MW_{el}-Leistungsklasse als Schaufenster für die Industriepotenziale im Land aufgebaut. Über 40 Firmen aus Baden-Württemberg haben Komponenten, Technologien und Know-how in den Systemdemonstrator eingebracht. Das alkalische Druckelektrolysesystem ist in einem Baukastensystem modular konzipiert, sodass die Technologie auch in größere Leistungsklassen skaliert und flexibel an unterschiedliche Kundenanforderungen und Standortgegebenheiten angepasst werden kann. Insbesondere die ZSW-patentierete Elektrolysestack-Technologie, das Herzstück der Anlage, wurde weiterentwickelt, um die Effizienz des Elektrolyseprozesses zu erhöhen und die Herstellungskosten für grünen Wasserstoff zu senken. Der Demonstrator ist im Herbst 2022 am ZSW erfolgreich in Betrieb genommen worden. Ein wesentliches Element des Projekts ist auch der begleitende Industriedialog, der auf große Resonanz stößt: Bislang beteiligen sich bereits über 70 Unternehmen aktiv an dem Austausch. Mehrere Produktentwicklungen im Bereich Elektrolyse konnten auf Landesebene initiiert werden. Weitere Unternehmen sollen für die Industrialisierung der Technologie gewonnen werden – auch mit Blick auf die Wasserstoff-Modellregion H₂ GeNeSiS in Stuttgart. Hier soll der Demonstrator ab 2025 Wasserstoff in eine Pipeline entlang des Neckars einspeisen.

// Electrolysis made in Baden-Württemberg

The aims of the joint project “Electrolysis Made in Baden-Württemberg”, which is funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, are to strengthen the competitiveness of the local enterprises in the field of electrolysis and to advance the roll-out of the technology on an industrial scale. With these aims in mind, an electrolyser in the 1 MW_{el} performance class was set up at the ZSW to showcase the industrial potential in the state. Over 40 companies from Baden-Württemberg have contributed components, technological input and know-how to the demonstration system. The alkaline high-pressure electrolysis system is modular in design and so the technology has the scalability to be upgraded to higher performance classes and the flexibility to be adapted to different customer requirements or site conditions. The electrolysis stack technology, which is the heart of the system and has been patented by the ZSW, has most notably been fine-tuned with a view to increasing the efficiency of the electrolysis process and reducing the production costs for green hydrogen. The demonstration system was successfully put into operation at the ZSW in autumn 2022. Another key element of the project is the wider discussion in industry and the great response so far, with more than 70 enterprises already joining in the conversation. Several product developments in the field of electrolysis have been mobilised at regional government level. There are hopes of recruiting further companies for the roll-out of the technology on an industrial scale – including in view of the use of Stuttgart as a model region for the flagship H₂ GeNeSiS hydrogen project. The demonstration system is due to feed hydrogen into a pipeline along the Neckar here from 2025 onwards.



// Der am ZSW entwickelte Elektrolyseur ist ein Schaufenster für die Industriepotenziale im Land.

// The electrolyser developed at the ZSW is a showcase for the industrial potential in the state.

// **Tonja Marquard-Möllenstedt**

E-mail: tonja.marquard-moellenstedt@zsw-bw.de

Phone: +49 711 78 70-285



// Direct Air Capture made in Baden-Württemberg

CO₂ ist neben Wasserstoff ein wichtiger Baustein, um synthetische Roh- und Kraftstoffe (eFuels) zu erzeugen. Für die großskalige Produktion von eFuels wird es notwendig sein, CO₂ in großen Mengen aus der Luft zu gewinnen. Baden-Württemberg bietet mit seinen Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau ideale Voraussetzungen, um der vergleichsweise jungen Direct-Air-Capture(DAC)-Technologie schnell zur Marktreife zu verhelfen. In dem vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekt „DAC-BW“ werden Forschung und Industrie an einen Tisch gebracht. Ziel des vom ZSW koordinierten Projekts ist es, eine wettbewerbsfähige, industrielle DAC-Fertigung in Baden-Württemberg aufzubauen. In einem Industriedialog werden relevante Unternehmen zur Herstellung von Komponenten und Teilsystemen bis hin zur Komplettanlage qualifiziert. Im Rahmen dieses Industrietransfers sollen DAC-Entwicklungs- und Produktionsaktivitäten initiiert werden. Grundlage des Projekts bildet dabei der praxisnahe Betrieb einer vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten DAC-Anlage mit einer Abscheiderate von ca. 100 Tonnen Kohlenstoffdioxid pro Jahr, die im Frühjahr 2023 am ZSW in Betrieb geht. Die Analyse der wirtschaftlichen und technischen Parameter des Forschungs- und Demonstrationetriebs dient zur späteren Weiterentwicklung und Skalierung der DAC-Technologie. Parallel dazu ermittelt das Fachgebiet Systemanalyse am ZSW die Rahmenbedingungen für die Industrialisierung von DAC auf Basis einer Analyse des CO₂-Marktes. Auch die Wertschöpfungsmöglichkeiten für die Industrie in Baden-Württemberg werden erarbeitet.

// Direct air capture systems made in Baden-Württemberg

Aside from hydrogen, CO₂ is a key building block in the production of synthetic raw materials and fuels (e-fuels). It will be necessary for the large-scale production of e-fuels to extract large quantities of CO₂ from the air. With its strong mechanical and plant engineering sector, Baden-Württemberg boasts the ideal conditions to help enterprises move quickly to bring the comparatively young technology of direct air capture (DAC) to the point of commercial viability. Research and industry will come round the table together in the "DAC-BW" project, which is being funded by the Baden-Württemberg Ministry of Transport. Coordinated by the ZSW, the project aims to set up a competitive DAC production industry in Baden-Württemberg. The dialogue will extend to the selection of eligible companies for the production of components and units right through to turnkey systems. There are plans to mobilise DAC development and production operations as this technology is transferred to industry. Central to the project will be the operation of a prototype DAC system funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs with a separation rate of around 100 tons of carbon dioxide per year which is set to go into operation at the ZSW in the spring of 2023. The analysis of the economic figures and technical parameters of the research and demonstration pilot will be used further down the line for the ongoing development and scaling of the DAC technology. The Systems Analysis department at the ZSW is engaged in a parallel assessment of the general framework for the roll-out of DAC on an industrial scale based on an analysis of the CO₂ market. The sources of potential for added value in industry in Baden-Württemberg will also be explored.



// Das ZSW baut eine industrielle DAC-Fertigung in Baden-Württemberg auf.

// The ZSW is setting up an industrial DAC production facility in Baden-Württemberg.

// **Raphael Vollmer**

E-mail: raphael.vollmer@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-171



// Test- und Innovationszentrum Elektrolyse

Das ZSW und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart forschen und entwickeln seit vielen Jahren im Bereich Wasserelektrolyse. Gemeinsam decken sie alle verfügbaren Elektrolysetechnologien ab. Seit Frühjahr 2022 bündeln die beiden Institute ihre Kompetenzen im Projekt „ElyLab“ (Test- und Innovationszentrum Elektrolyse), das Unternehmen Test- und Prüflabore für Elektrolyse anbietet, um sie bei der Technologieentwicklung und -qualifizierung zu unterstützen. Im Zuge des Markthochlaufs von Wasserstoff wird die Nachfrage nach Testzentren in den nächsten Jahren erheblich zunehmen. Zu diesem Ergebnis kam auch eine vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderte Machbarkeitsstudie, die den Testbedarf der Elektrolyseindustrie in Deutschland und Europa erfasst hat.

Die Studie zeigt auf, dass technologieübergreifend etwa 40 Prüfstände – vor allem für Elektrolysestacks und deren Komponenten – mit einer elektrischen Anschlussleistung von insgesamt bis zu ca. 7 Megawatt erforderlich sind, um die Testbedarfe in den kommenden Jahren decken zu können. ZSW und DLR beabsichtigen, das Testzentrum ElyLab an einem eigenen Standort im Großraum Stuttgart deutlich zu erweitern. Für die erforderlichen etwa 2.500 m² Fläche wird deshalb nach einer Industriehalle gesucht, die kurzfristig zur Verfügung steht und wo der erzeugte Wasserstoff für Wasserstoffanwendungen oder zusammen mit der bei der Elektrolyse anfallenden Abwärme direkt von Industrieunternehmen in der Nähe genutzt werden kann. Damit könnten auch die Produktionsprozesse angrenzender Unternehmen klimaneutral gestaltet werden.

// Electrolysis testing and innovation centre

The ZSW and the German Aerospace Center (DLR) in Stuttgart have been conducting research and development in the field of water electrolysis for many years, and together they cover all the available electrolysis technologies. The two institutes have been pooling their expertise since the spring of 2022 in the “ElyLab” project (testing and innovation centre for electrolysis) which offers companies trial facilities and test laboratories for electrolysis in an attempt to assist them in the development and validation of technologies. The demand for test centres will increase significantly over the next few years as the hydrogen market ramps up. A feasibility study funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs came to the same conclusion after gathering data on the testing requirements in the electrolysis industry in Germany and Europe.

The study reveals that around 40 test rigs spanning all technologies – mainly for electrolysis stacks and their components – with an electric power rating totalling up to about 7 megawatts will be required in order to be able to meet the test requirements in the coming years. The ZSW and DLR have plans for a site of their own in the greater Stuttgart area for a significant expansion of the ElyLab test centre. And so the search is on for a factory building offering the required surface area of about 2,500 m², and available at short notice, where the hydrogen produced can be used straight away for hydrogen applications by industrial enterprises in the immediate vicinity or combined with the waste heat generated during the electrolysis process and then used. This could also help neighbouring enterprises in their quest for carbon-neutral production processes.



// Modernste Elektrolysetechnologie am ZSW.
// State-of-the-art electrolysis technology at the ZSW.

// **Stefan Steiert**
E-mail: stefan.steiert@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-257

// Akkumulatoren Materialforschung (ECM)

Accumulators Materials Research (ECM)

// Unsere Kernkompetenzen

Zentrale Aufgabe des Fachgebiets ECM ist die Entwicklung leistungsfähigerer Akkumulatoren – von den Materialien bis hin zur Zelle. Die Substitution kritischer Rohstoffe durch breiter verfügbare Ressourcen inklusive Aufarbeitung von Materialien aus Recycling für Lithium-Ionen-Batterien steht dabei im Vordergrund. Die Arbeiten schließen auch Elektrodenmaterialien für zukünftige Systeme wie beispielsweise Natrium-Ionen-Batterien oder Post-Lithium-Speicher mit Magnesium oder Calcium mit ein.

Im Jahr 2022 wurde mit dem Aufbau eines Technikums (Powder-Up) für die Hochskalierung der Synthese von Kathodenmaterialien im 10-kg- bis 100-kg-Maßstab begonnen, um die Bereitstellung maßgeschneiderter Pulver für die weitere Zellentwicklung sicherzustellen. Die großtechnisch etablierte Prozesskette von der Herstellung von Metallsalzlösungen über die Precursorherstellung und Kalzination bis hin zur Oberflächenbehandlung wird dabei vollständig abgebildet.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Entwicklung neuer Elektrodenprozesse, bei denen entweder wasserbasierte und fluorfreie Binder eingesetzt werden oder vollständig auf Lösungsmittel verzichtet werden kann. Die Elektroden werden in kleinen Pouchzellen oder zylindrischen Zellen in den Formaten 18650 und 21700 evaluiert. Hier steht die Etablierung neuer Fertigungsprozesse für zukünftige Lithium-Zellgenerationen mit leistungsfähigerem Zelldesign im Vordergrund. Zur Schadensanalyse und für die Bewertung neuer Zellen ist das Fachgebiet auf die Weiterentwicklung von Inline-Analyseverfahren und Post-mortem-Analyse spezialisiert. Sie sind essenziell für das Verständnis von Alterungsprozessen und potenziellen Sicherheitsrisiken sowie für die Optimierung des Zelldesigns.

// Our core areas of expertise

The main brief of the ECM department is to develop accumulators with ever greater capacity – from the materials right through to the cell. The focus is on substituting critical raw materials with more widely available resources, including the processing of recycled materials for lithium-ion batteries. Research is also conducted into electrode materials for future systems, such as sodium-ion batteries or post-lithium storage solutions with magnesium or calcium.

Work started in 2022 on a pilot plant (Powder-Up) with a view to scaling up the synthesis of cathode materials on the 10 kg to 100 kg level in a bid to ensure the provision of powders specially tailored to further cell development. The large-scale process chain is fully mapped, from the production of metal salt solutions to the precursor production and calcination right through to the surface treatment.

Another focal point is the development of new electrode processes, using either water-based and fluorine-free binders or making it possible to dispense entirely with the use of solvents. The electrodes are evaluated in small pouch cells or in cylindrical cells in size formats 18650 and 21700. The work in this case revolves around the establishment of new manufacturing processes for future generations of lithium cells of a more powerful design. The department specialises in the further development of in-line analytical methods and post-mortem examinations for the analysis of failures and the assessment of new cells. These are essential for understanding ageing processes and potential safety risks and for optimising cell design.



„Der Aufbau einer vollständigen Kreislaufwirtschaft für Energiespeicher eröffnet neue wettbewerbsfähige Zukunftsperspektiven für Europa und bietet enorme Potenziale zur Ressourcen- und Energieeinsparung.“

„The completion of a proper circular economy for energy storage will open up new prospects for Europe in terms of future competitiveness and will offer enormous potential for the conservation of resources and energy.“

// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens, Head of Department
E-mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de, Phone: +49 731 9530-612

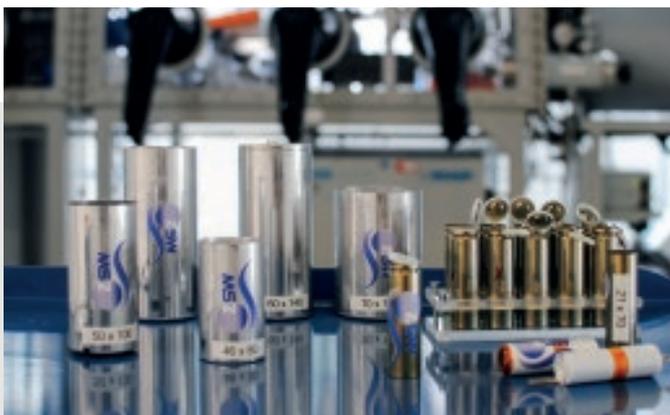


// Zylindrische Zellen im „Tabless Design“

Zylindrische Zellen unterschiedlichen Formats werden sowohl in der Elektromobilität als auch im Industriebereich breit eingesetzt. Sie zeichnen sich durch eine hohe Energie- und Leistungsdichte sowie relativ kostengünstige Fertigungsprozesse aus.

In dem vom Bundesforschungsministerium (BMBF) geförderten Projekt „RollBatt“ liegt der Schwerpunkt auf einer weiteren Optimierung des Zelldesigns zur Erhöhung der Leistung und der Lebensdauer. Herkömmliche Wickelzellen enthalten an den Elektrodenwickeln aufgeschweißte Ableitertabs, die zu einer Asymmetrie und zu mechanischen Verwerfungen mit zunehmender Alterung führen. Durch Assemblierung von Rundzellen mit neuen Konfigurationen, bei denen die Ableiter nicht aufgeschweißst werden, sondern aus mehreren oder durchgängigen Folientabs bestehen, konnten der Innenwiderstand der Rundzellen signifikant reduziert und die Zyklenlebensdauer der Zellen um bis zu 20 Prozent gesteigert werden. Die handgefertigten Prototypzellen zeigen eine sehr gute Reproduzierbarkeit.

In dem vom BMBF geförderten Projekt „Power-Zell“ errichtet das ZSW bis Ende 2023 eine Pilotlinie zum Bau von Wickelzellen mit Folienableitern, sogenanntes „Tabless-Design“. Die flexibel ausgelegten Anlagen ermöglichen neben dem Bau von 18650- und 21700-Zellen auch die Fertigung größerer Rundzellenformate. Damit wird der Transfer innovativer Zellkonzepte in die industrielle Massenproduktion beschleunigt. Darüber hinaus eröffnet diese zusätzliche Anlage in Kombination mit den Anlagen der ZSW-Forschungsplattform für die industrielle Produktion großer Lithium-Ionen-Batterien (FPL) die Möglichkeit eines direkten Designvergleichs zwischen Wickelzellen, Pouch- und prismatischen Zellen mit identischen Materialkombinationen.



// Cylindrical cells of “tabless design”

Cylindrical cells of different sizes are widely used both in the electromobility market and in the industrial sector. They boast high energy and power density and relatively inexpensive manufacturing processes.

The main focus in the “RollBatt” project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), is on a further optimisation of the cell design in order to increase the performance and service life. Conventional wound cells contain conductor tabs welded onto the electrode windings, leading to a state of asymmetry and to mechanical warping with increasing age. By assembling round cells with new configurations, in which the conductors are not welded on but consist of several foil flags or one continuous foil tab, it was possible to obtain a significant reduction in the internal resistance of the round cells and an increase of up to 20 per cent in the cycle life of the cells. The handmade prototype cells boast excellent reproducibility.

The BMBF-funded “Power-Zell” project will see the ZSW setting up a pilot line by the end of 2023 for the assembly of wound cells with foil conductors referred to as a “tabless design”. In addition to the production of 18650 and 21700 cells, the lines will be sufficiently flexible to allow the manufacture of round cells in larger sizes. This will accelerate the transfer of innovative cell designs to industrial mass production. This additional machine, combined with the systems of the ZSW research platform for the industrial production of large lithium-ion cells (FPL), will also open up the possibility of a direct comparison of the designs of wound cells, pouch cells and prismatic cells with identical combinations of materials.

// Wickelzellen mit Folienableitern, sogenanntes „Tabless Design“, in unterschiedlichen Formaten.
 // Wound cells with foil conductors, referred to as a „tabless design“, in different sizes.

// Dr. Rares-George Scurtu

E-mail: rares-george.scurtu@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-545



// Analyseverfahren für eine nachhaltige und kostengünstige Batteriezellfertigung

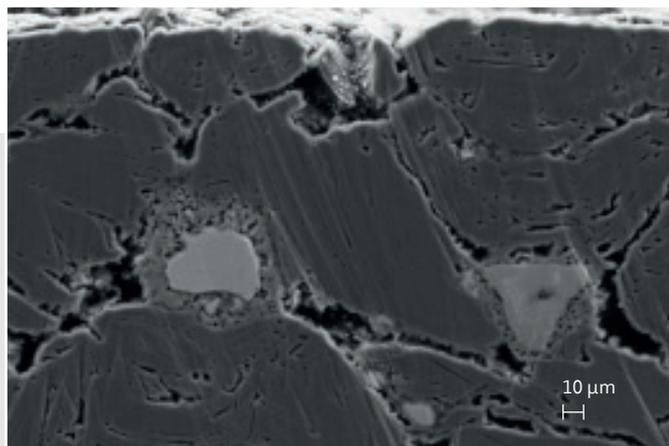
Das vom ZSW mitkoordinierte Kompetenzcluster AQua ist Teil des Dachkonzepts des Bundesforschungsministeriums zur Batterieforschung. Die Mission des Clusters ist die Erarbeitung eines umfassenden prozessübergreifenden Verständnisses von Eigenschafts-Struktur-Beziehungen zwischen Materialien, Fertigungsschritten und elektrochemischen Kenndaten. In insgesamt elf Forschungsprojekten, von denen das ZSW an fünf direkt beteiligt ist, arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 16 Instituten deutscher Universitäten und Forschungseinrichtungen gemeinsam an der Bereitstellung fertigungsbegleitender und fertigungsintegrierter Analyseverfahren für eine nachhaltige und kostengünstige Batteriezellfertigung in Deutschland.

Im Projekt „MICHA“ wurde ein „Best Practise“-Workflow zur mikrostrukturellen und chemischen Charakterisierung kommerzieller Zellen entwickelt, der exemplarisch auf eine kommerzielle Zelle im Format 21700 angewandt wurde, um diese mit komplementären bildgebenden und spektroskopischen Methoden umfangreich zu analysieren. Im Fokus standen hier der Methodenvergleich und die Fehlerbetrachtung. So zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der ermittelten Daten der chemischen Analyse von Kathodenaktivmaterialien zwischen EDX-Messungen bei verschiedenen Partnern und ICP-OES-Analysen. Durch Verbindung mit der bildgebenden Analyse wurden wichtige Einflussparameter in der Mikrostruktur auf die Zellperformance herausgearbeitet.

// Analysis methods for sustainable and inexpensive battery cell production

The AQua research cluster, which is jointly coordinated by the ZSW, is a body of excellence within the umbrella strategy for battery research adopted by the Federal Ministry of Education and Research. The mission of the cluster is to develop an understanding spanning the full breadth of processes and unpacking the correlations between materials, manufacturing steps and electrochemical specifications in terms of properties and structures. Research scientists from 16 institutes at German universities and research establishments are working together in a total of 11 research projects, five of which directly involve the ZSW, with a view to providing in-line and in-process analysis methods for sustainable and inexpensive battery cell production in Germany.

A “best practice” workflow for the specification of the microstructure and chemical characteristics of commercial cells was developed in the “MICHA” project and then applied to a 21700 commercial cell as an example, in order to conduct a detailed analysis of it using complementary imaging methods and spectroscopic measurements. The focus here was on comparing methods and analysing possible sources of error. There is a high level of congruity in the data obtained from the chemical analysis of cathode active materials between EDX measurements at various partners and ICP-OES analyses. Key parameters in the microstructure which have an influence on the cell performance were identified through association with the imaging analysis.



// REM-Aufnahme einer Silizium/Grafit-Anode aus einer gealterten Zelle mit Änderungen im Mikrostrukturbereich. M. Flügel et al., J. Electrochem. Soc. 169 (2022) 050533.

// SEM image of a silicon/graphite anode from an aged cell showing changes in the microstructure. M. Flügel et al., J. Electrochem. Soc. 169 (2022) 050533.

// Dr. Thomas Waldmann

E-mail: thomas.waldmann@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-212



// Kostengünstige Kathodenmaterialien auf Schichtoxidbasis

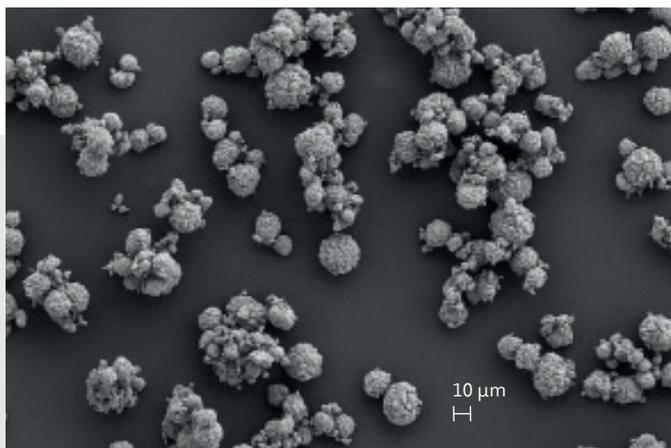
Globale Emissionsneutralität erfordert eine grundlegende Transformation des Energiesektors hin zu erneuerbaren Energien und deren Zwischenspeicherung. In Natrium-Ionen-Batterien werden die kritischen Rohstoffe Lithium, Nickel, Kobalt und Kupfer, die essenziell für die heute präferierten Lithium-Ionen-Batterien sind, durch günstige, verfügbare Rohstoffe substituiert, was zur Ressourcenschonung beiträgt. Eine Natrium-Ionen-Zelle mit Flüssigelektrolyt, Schichtoxidgekathode und Hard-Carbon-Anode kann als Drop-in-Technologie auf bestehenden Zellfertigungsanlagen produziert werden, sodass im Erfolgsfall eine schnelle Markteinführung möglich ist. Durch die sich ergänzenden Eigenschaften von Natrium-Ionen-Batterien (Tieftemperaturperformance, Ratenfestigkeit, hohe Sicherheit) und Lithium-Ionen-Batterien (hohe Energiedichte) können die Speichersysteme anwendungsspezifisch eingesetzt werden.

In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „TRANSITION“ entwickelt das ZSW gemeinsam mit Partnern kostengünstige Kathodenmaterialien auf Schichtoxidbasis. Ein wichtiger Schwerpunkt liegt auf der Skalierbarkeit in größeren Maßstab und der Bereitstellung geeigneter Materialmengen sowohl für Anode als auch Kathode für die weiteren Zellfertigungsschritte. Für die Kathodenmaterialien wird zudem speziell am Partikeldesign gearbeitet, um die Kompatibilität mit gängigen Fertigungstechnologien zu gewährleisten und die Materialeigenschaften auf den jeweiligen Anwendungsfall zu optimieren. Auf der Anodenseite konnte ein auf Kartoffelstärke basierender Hard Carbon erfolgreich in den kg-Maßstab aufskaliert werden.

// Inexpensive cathode materials based on layered oxides

Global neutrality in emissions requires a fundamental transformation of the energy sector towards renewable energies and their intermediate storage. Lithium, nickel, cobalt and copper, the critical raw materials which are essential for the lithium-ion batteries preferred today, are substituted in sodium-ion batteries by cheap and readily available raw materials, duly contributing to the conservation of resources. A sodium-ion cell with liquid electrolyte, layered oxide cathode and hard carbon anode can be produced on existing cell production lines, allowing a rapid market launch if this drop-in technique is successful. Given the complementary properties of sodium-ion batteries (low-temperature performance, rate stability, high level of safety) and lithium-ion batteries (high energy density), the storage systems can be tailored to specific applications.

In the “TRANSITION” project funded by the Federal Ministry of Education and Research, the ZSW is working with partners to develop inexpensive cathode materials based on layered oxides. One important focal point is the scalability to higher levels and the provision of suitable amounts of material for both anode and cathode for the further cell manufacturing steps. Additional work is also being done on the particle design for the cathode materials in order to ensure compatibility with common production technologies and to optimise the material properties for the application in any given case. On the anode side, a hard carbon based on potato starch has been successfully scaled up to the kg level.



// Partikel des Natrium-Nickel-Mangan-Schichtoxids, das im Projekt entwickelt und bis in den Kilogramm-Maßstab skaliert wurde.

// Particles of the sodium-nickel-manganese-based layered oxide developed in the project and scaled up to the kilogramme mark.

// Dr. Peter Axmann

E-mail: peter.axmann@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-404

// 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 der Arbeiten des Fachgebietes ECP liegt in der Weiterentwicklung von Herstellprozessen zur seriennahen Produktion von Batteriezellen. Hierfür betreibt das Fachgebiet seit acht 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 kosteneffiziente Abläufe. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um die Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Maßstab.

Das ECP-Team besteht aus erfahrenen TechnikerInnen, IngenieurInnen und WissenschaftlerInnen, deren Kernaufgabe es ist, 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 Batterie-zellproduktion in Deutschland aufgebaut werden soll.

// Our core areas of expertise

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

The focus of the work of the ECP department is on the further development of manufacturing processes for the pre-series production of battery cells. For the last eight 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 and manufacturing costs, in-line sensors, production tolerances and cost-efficient processes. When it comes to new materials and components, the emphasis is on the evaluation of processability and quality on an industrial scale.

The ECP team is made up 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 plants and the improvement of individual processes right through to quality control procedures. Given the 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 with a view to stepping up battery cell production in Germany.



„Mit der Forschungsproduktionslinie stellen wir unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft eine flexible, fortschrittliche Testumgebung für gemeinsame Projekte zur Batteriezellproduktion zur Verfügung.“

// Dr. Wolfgang Braunwarth, Head of Department
E-mail: wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de, Phone: +49 731 9530-562

“In providing the research production line, we are offering our partners in industry and science a modern and flexible test environment for joint battery cell production projects.”



// Optimierung von Batterieeigenschaften durch angepasstes Feuchtmanagement

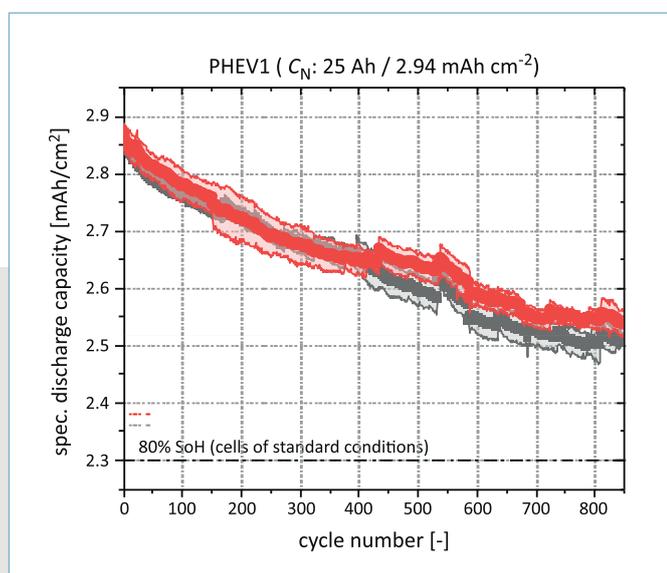
Ziel des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekts „EPIC“ ist die Reduzierung der Produktionskosten von Batterieelektroden durch eine Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit um mindestens 50 Prozent und eine Senkung der Energiekosten um mindestens 20 Prozent gegenüber dem aktuellen Stand der Technik. Erzielt wird dies durch die Verwendung innovativer Trocknungstechnologien, eine wissenschaftsbasierte sowie energetisch und qualitätsmäßig bestmöglich realisierte Auslegung der Prozessführung und ein materialsystemspezifisch angepasstes Feuchtmanagement entlang der Prozesskette.

Dazu wird am ZSW in Ulm im Labor die Trocknung von Batteriematerialien mit verschiedenen Trocknungsverfahren getestet, die Produktqualität und Prozesseffizienz verbessern sowie Produktionskosten senken sollen. Der Trocknungsprozess limitiert die Produktionsgeschwindigkeit, denn eine zu hohe Trocknungsrate verschlechtert die Elektrodeneigenschaften. Neben der Trocknung ist der Wassergehalt in der Produktionsumgebung ebenfalls von großer Wichtigkeit, da die Umgebungsfuchte, ebenso wie die Trocknungsbedingungen, das Betriebsverhalten von Batterien wie Kapazität, Leistung und Lebensdauer signifikant beeinflussen kann.

// Optimisation of battery properties through adapted moisture management

The aim of the “EPIC” project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research, is to reduce the cost of producing battery electrodes by increasing the drying speed by at least 50 per cent and reducing the energy costs by at least 20 per cent as compared to the levels obtained with the current technology. This will be achieved through the use of innovative drying systems, the input of knowledge into process design, optimum control in terms of energy and quality, and an approach to moisture management along the process chain which is adapted to the specific materials.

Tests will therefore be run on battery materials in the ZSW laboratory in Ulm using various drying processes which are intended to improve product quality, increase process efficiency, and reduce production costs. The drying process limits the production speed because an excessively high drying rate will impair the electrode properties. Another issue of great importance alongside the drying process is the water content in the production environment because the ambient humidity, and also the drying conditions, can significantly affect aspects of the operating behaviour of batteries like capacity, performance and service life.



// Einfluss der Restfeuchte auf das Entladeverhalten von PHEV-1-Batteriezellen.
 // Influence of residual moisture on the discharge performance of PHEV-1 battery cells.

// Sebastian Lukas
 E-mail: sebastian.lukas@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 95 30-362



// Optimierte Lithium-Ionen-Zellen durch datenbasierte Methoden

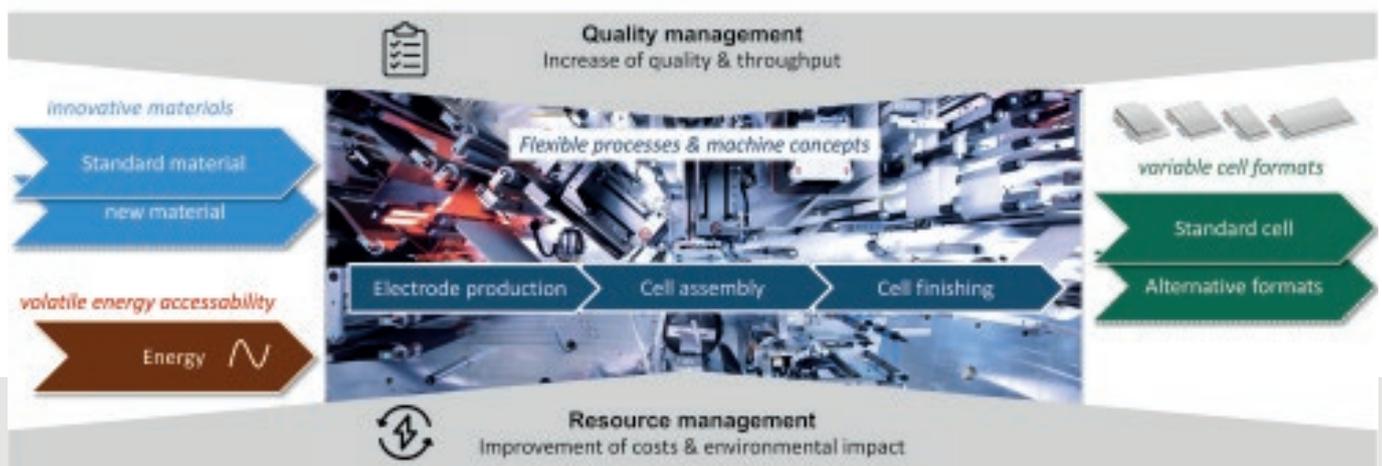
Eine der größten Herausforderungen in der Batteriezellproduktion ist die Steigerung der Qualität bei gleichzeitiger Kostensenkung. Gerade große Lithium-Ionen-Zellen sind schon bei kleinsten Fehlern in der Herstellung sehr störanfällig, was sich negativ auf die Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Zellen auswirkt. In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „E-Qual“ wird mit Hilfe datenbasierter Modelle der Einfluss verschiedener Fertigungsparameter auf die Zellproduktion erforscht. Übergeordnetes Ziel ist die Steigerung der Qualität der Batteriezellen bei geringeren Herstellkosten und verbessertem ökologischem Impact.

Im Mittelpunkt der Arbeiten stehen insbesondere neue Material- und Zelldesigns sowie deren geänderte Anforderungen an die Qualitätssicherungsmaßnahmen und den Ressourceneinsatz. Mit Hilfe des Produktionsteilsystems der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen“ (FPL) des ZSW in Ulm werden die notwendigen Daten erfasst, in ein Modell überführt, variiert und Effizienzpotenziale abgeleitet. Die Ergebnisse werden abschließend in einem Handlungsleitfaden gebündelt, mit dem die Herstellprozesse hinsichtlich Qualität und Ressourcenverbrauch gezielter optimiert werden können.

// Data-based methods for the optimisation of Li-ion cells

One of the biggest challenges in battery cell production is increasing quality while at the same time reducing costs. Large lithium-ion cells in particular are very susceptible to faults, even if the slightest error has been made during their production, and this has a negative effect on the safety, performance and service life of the cells. The influence of various manufacturing parameters on cell production is being explored with the help of data-based models in the “E-Qual” project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research. The overarching goal is to increase the quality of the battery cells while lowering manufacturing costs and lessening environmental impact.

The work focuses in particular on new material and cell designs and their implications in terms of quality control systems and the use of resources because of the different requirements. The production control system for the “research platform for the industrial production of large lithium-ion cells” (FPL) at the ZSW in Ulm is used to record and transfer the necessary data to a model in order to run variations and calculate the potential for efficiency enhancement. The results are finally bundled in a set of guidelines which allow more systematic optimisation of the manufacturing processes in terms of quality and resource input.



// Qualitäts- und Ressourcenmanagement in der Batteriezellproduktion.
// Management of quality and resources in battery cell production.

// Dr. David Becker-Koch
E-mail: david.becker-koch@zsw-bw.de
Phone: +49 731 95 30-712



// Erweiterung der Forschungsproduktion für Lithium-Ionen-Zellen

Die in den Batterien verbauten Zellen stellen das entscheidende Element für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Elektromobilität dar und weisen zudem einen sehr hohen Wertschöpfungsanteil am Gesamtsystem auf. Für die Zukunft der Elektromobilität hierzulande ist daher die Ansiedlung von Batteriezellfertigungen in Deutschland und Europa eine Grundvoraussetzung, um Leitanbieter für die Elektromobilität zu werden. Ein Problem besteht darin, dass für den Aufbau einer industriellen Massenfertigung hohe Investitionen getätigt werden müssen, ohne die Serientauglichkeit der Produkte zu kennen.

In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „ZellkoBatt“ errichtet das ZSW in Ulm bis Mitte 2023 eine Pilotanlage zum Bau von großformatigen Pouch- und PHEV-2-Zellen bis 80 Amperestunden sowie Rundzellen vom Typ 21700. Damit wird der Transfer innovativer Batteriezellen in die industrielle Massenproduktion beschleunigt und eine Brücke von der prototypischen Demonstration zur industriellen Massenproduktion in Deutschland geschlagen.

Neben der Erweiterung der Pilotlinie steht die Entwicklung innovativer, industrietauglicher Material-, Zell- und Produktionskonzepte im Zentrum der Aktivitäten. So werden beispielsweise auch alle Produktionssysteme und -prozesse mittels künstlicher Intelligenz durchgängig vernetzt, um signifikante Verbesserungen in der Qualität, Flexibilität, Geschwindigkeit (Time-to-Market) und Effizienz zu erzielen.

// Expansion of research for Li-ion cell production

The cells installed in batteries are key to efficient and competitive electromobility and they also account for a very high share of added value in the overall system. It is essential to have battery cell production facilities setting up bases in Germany and Europe in order to secure a future in electromobility in this country and to become a leading provider in the field. One problem is that large amounts of capital expenditure are required to set up mass production facilities without knowing whether the products will be suitable for series production on an industrial scale.

The “ZellkoBatt” project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research, will see the ZSW develop a pilot plant in Ulm by the middle of 2023 for the assembly of large-sized pouch cells and PHEV2 cells of up to 80 ampere-hours and 21700 round cells. This will accelerate the transfer of innovative battery cells to industrial scale production and build a bridge from prototype demonstration to mass production in Germany.

One focus of the work is the expansion of the pilot line and another is the development of innovative, industrial-grade materials, cell designs and production systems. All the production systems and production processes will be networked using artificial intelligence, for example, in order to achieve significant end-to-end improvements in quality, flexibility, speed (time to market) and efficiency.



// Neue Zellformate am ZSWL: Pouch- und PHEV-2-Zellen bis 80 Amperestunden sowie 21700-Rundzellen.

// New cell formats in production as research facilitates pouch and PHEV2 cells of up to 80 ampere-hours and 21700 round cells.

// Steffen Bazlen

E-mail: steffen.bazlen@zsw-bw.de

Phone: +49 731 95 30-513

// Akkumulatoren (ECA)

Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECA betreibt das Batterietestfeld am ZSW und untersucht elektrochemische Zellen, Module sowie Energiespeichersysteme bis 1.000 V und 360 kW. Die Charakterisierung der elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie die Untersuchung des Verhaltens im Fehlerfall oder in Unfallsituationen 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.

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. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Unterdrückung der Fehlerausbreitung durch thermische Propagation im System. Dazu betreibt das Team drei Sicherheitstestbunker inklusive einer aufwendigen Abgasreinigung. Herzstück des Teams Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Simulation von Zellen und Batteriesystemen einschließlich der Algorithmen für den Batteriezustand und das Batteriemangement. Erforscht werden weiterhin die optimale Laderegulierung unter Schnellladebedingungen, der Einfluss von Rippleströmen sowie von mechanischen Kompressionskräften auf die Performance, die zu erwartende Lebensdauer und die Sicherheit.

// Our core areas of expertise

The ECA department operates the battery test site at the ZSW and conducts research into electrochemical cells, modules and energy storage systems up to 1,000 V and 360 kW. The work focuses on the specification of the electrical, thermal and mechanical properties under different operating conditions and on investigating the behaviour and response in cases of failure or in accidents. In terms of the applications for which the batteries are used, consideration is given to mobile and stationary energy storage, especially in electrified power trains in vehicles – whether on land, on water or for aviation.

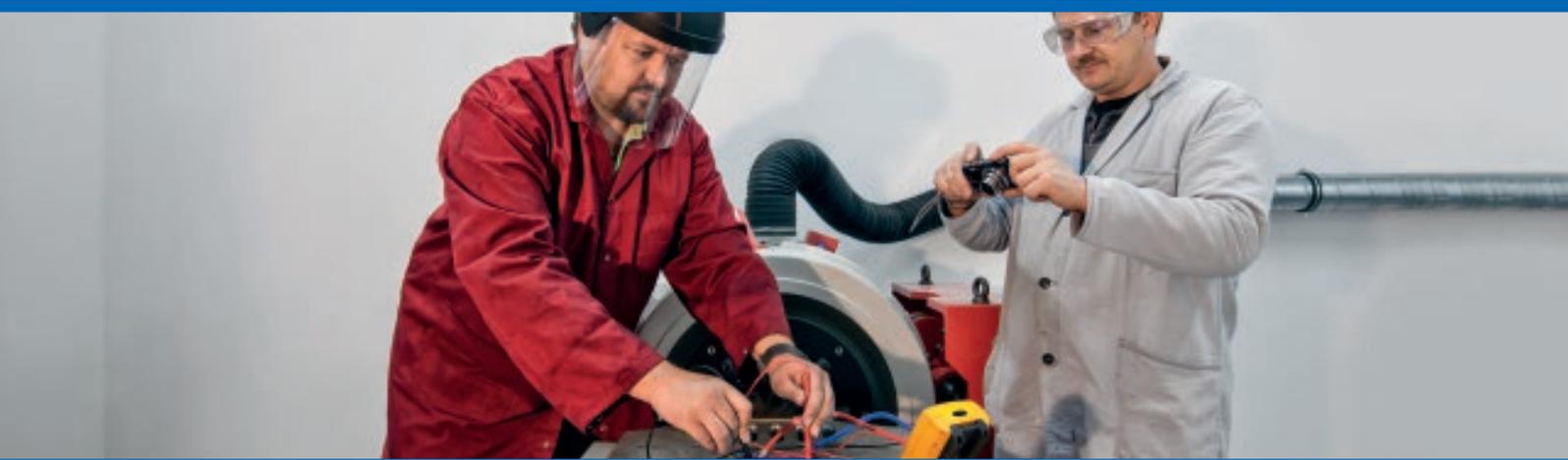
The electrical testing teams carry out tests on cells, modules and systems, checking that they are working properly and measuring their performance, for example, and calculating their expected service life. The safety team uses destructive tests to assess the potential risks to which accumulators might be exposed in case of extreme damage. One focal point is the suppression of fault propagation through thermal runaway in the system. The team operates three safety test bunkers for this purpose, including an elaborate exhaust gas treatment system. The battery system technology team is mainly concerned with the thermal and electrical simulation of cells and battery systems, including algorithms for battery state and battery management. Other areas of research include the optimum control under fast charging conditions, the influence of ripple currents and of mechanical compression forces on the performance, the expected service life and safety.



„Batterien für Elektrofahrzeuge werden immer leistungsfähiger und dadurch größer. Größere Zellen sind jedoch von Haus aus weniger sicher. ECA kann die Sicherheit solcher Zellen detailliert untersuchen und ist ein geschätzter Entwicklungspartner bei allen großen Batterie- und Zellentwicklern.“

// Dr. Olaf Böse, Head of Department
E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de, Phone: +49 731 9530-551

“Batteries for electric vehicles are becoming increasingly powerful and therefore larger. Larger cells are inherently less safe, however. The ECA department can investigate the finer details when it comes to the safety of such cells, and its input in design is valued by all major battery and cell developers.”



// Vibrationsteststand um Laser-Doppler-Vibrometer erweitert

Der ZSW-Vibrationsteststand konnte 2022 um ein scannendes Laser-Doppler-Vibrometer (SLDV) erweitert werden. Das Messgerät ermöglicht bereits vor der beginnenden Alterung oder Zerstörung von Batteriezellen und Batteriemodulen schnelle zusätzliche Erkenntnisse aus Vibrationsuntersuchungen. Das SLDV untersucht die mechanischen Belastungen einer Batterie in einem Elektrofahrzeug während des Fahrbetriebs und ist daher für KundInnen ein wesentlicher Beitrag zum vertieften Verständnis ihrer Batterien unter mechanischem Stress.

Während der SLDV-Untersuchungen kommt es auf Basis des Dopplereffekts zur Überlagerung der hin- und rücklaufenden Lichtwellen des Lasers, die zu geringen Änderungen der Lichtfrequenz führen. Diese Frequenzänderungen werden erfasst und entsprechen den räumlichen Bewegungen der untersuchten Oberflächen. Die Analyse der Daten erlaubt somit die Erfassung geringster mechanischer Verformungen prinzipiell bis in den sub- μm -Bereich. Durch das Scannen der Oberfläche des Batterieprüflings durch den Laserstrahl entsteht ein dreidimensionales Abbild der verformten Oberfläche. Bei hoher zeitlicher Auflösung der nacheinander erfolgenden Oberflächenscans lässt sich dann auch die Bewegung der Oberfläche darstellen. Aufgrund der geringen Leistung des Laserlichts ist mit keiner Wirkung auf das Bauteil zu rechnen.

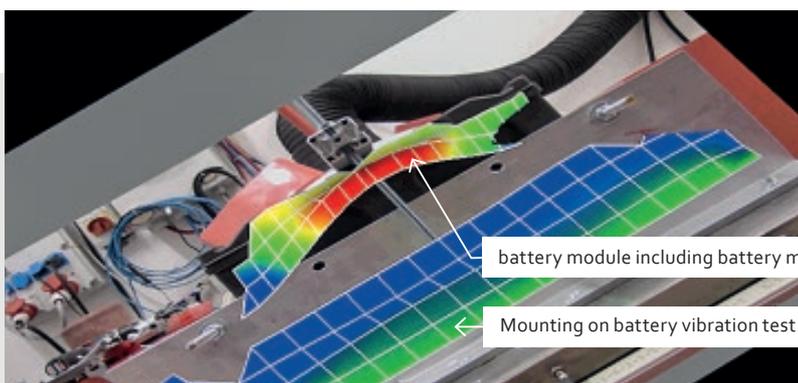
In dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten EXIST-Projekt „Endothermic Safety Concept“ (ESCO) wurde die Entwicklung von Propagationsschutzmaterialien für Batteriepacks weiter vorangetrieben. Durch derartige Einschübe zwischen einzelne Batteriezellen wird die Sicherheit des Batteriepacks deutlich erhöht. Das Start-up wurde Ende des Jahres 2022 formell gegründet und hat seine Arbeit in Richtung Serienproduktion und Kommerzialisierung aufgenommen.

// Vibration test rig extended to include laser Doppler vibrometer

The ZSW vibration test rig was extended in 2022 to include a scanning laser Doppler vibrometer (SLDV). The measuring device can be used to obtain quick results and additional findings in vibration tests even before the onset of ageing or destruction in battery cells and battery modules. The SLDV investigates the mechanical stresses on a battery in an electric vehicle while it is being driven and is therefore essential in helping customers come to a deeper understanding of the impact of mechanical stress on their batteries.

The Doppler effect causes the advancing and returning light waves of the laser to overlap during the SLDV tests, leading to minor changes in the light frequency. These frequency changes are recorded and correspond to the spatial movements of the surfaces being tested. The analysis of the data therefore allows the detection of minute mechanical deformations, down to the sub- μm range in principle. A three-dimensional image of the deformed surface is obtained in the test by scanning the surface of the battery with the laser beam. It is then possible, with successive surface scans at a high time resolution, to display the movement of the surface. There is unlikely to be any effect on the component due to the low power of the laser light.

The development of propagation prevention materials for battery packs was further advanced in the EXIST project “Endothermic Safety Concept” (ESCO), which was funded by the Federal Ministry of Economic Affairs. The safety of the battery pack is significantly increased by the insertion of such materials between individual battery cells. The start-up was formally established at the end of 2022 and has started its work in pursuit of series production and commercial marketing.



// Das SLDV erlaubt die Visualisierung von Deformationen während des Vibrationstests.

// The SLDV allows the visual rendering of deformations during the vibration test.

// Dr. Olaf Böse

E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-551

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

// Unsere Kernkompetenzen

Brennstoffzellen mit optimierten Elektroden und fluorfreien Elektrollytmembranen sowie Akkumulatoren mit wässrigen Elektrolyten eröffnen neue Perspektiven für Anwendungen im Verkehr und zur stationären Energiespeicherung. Das Fachgebiet ECG untersucht hierzu die Einflüsse der Zusammensetzung und Mikrostruktur auf die Leistungscharakteristik und Lebensdauer. Ein weiterer Fokus liegt auf Analysen zur Bildung von Deckschichten und zum Korrosionsverhalten metallischer Materialien beim Einsatz in PEM-Brennstoffzellen und Elektrolyseuren mit dem Ziel, die Leistungsdichte und Lebensdauer zu steigern sowie die Kosten zu senken.

Die experimentellen Arbeiten erfolgen vorwiegend an Modellelektroden und Modellzellen und werden mittels mathematischer Modellierung und Simulation sowie durch Tests in Vollformatzellen und Stacks unterstützt. Röntgen, Synchrotron- und Neutronentomographie erlauben In-operando-Einblicke während des Betriebs von Batterie-, Elektrolyse- und Brennstoffzellen. Zur Bestimmung der Elektrodenmikrostrukturen im Neuzustand wie auch im Verlauf der Betriebsdauer kommen die hochauflösende Bildgebung über Elektronenmikroskopie sowie tomographische Methoden zum Einsatz.

Das Fachgebiet ECG verfügt über langjährige Erfahrung mitsamt Infrastruktur, um völlig neue technologische Ansätze aufzugreifen und im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren. Durch die konsequente Verbesserung der Material- und Elektrodenzusammensetzung sowie der Elektrodenmikrostrukturen konnte die Leistungscharakteristik von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) für PEM-Brennstoffzellen bei hohen Stromdichten gesteigert werden. Umweltschutz und Recyclingaspekte spielen vor allem bei der Entwicklung fluorfreier Komponenten für Brennstoffzellen eine große Rolle.

// Our core areas of expertise

Fuel cells with optimised electrodes and fluorine-free electrolyte membranes and accumulators with aqueous electrolytes are raising new prospects for applications in the transport sector and for stationary energy storage. The ECG department is busy in this regard examining the influences of composition and microstructure on performance characteristics and service life. It is also heavily engaged in analyses of the formation of surface layers and of the corrosion behaviour of metallic materials when used in PEM fuel cells and electrolyzers with a view to increasing power density and service life and reducing costs.

The experimental work is mainly carried out on model electrodes and model cells with the added support of mathematical modelling and simulation as well as supplementary tests in full-size cells and stacks. X-ray, synchrotron and neutron tomography allow in-operando insights into battery cells, electrolysis cells and fuel cells. High-resolution imaging methods using electron microscopes and tomography are applied in order to examine the electrode microstructures, both when new and in the course of their service life.

The ECG department has many years of experience and also the infrastructure to adopt completely new approaches and to verify and demonstrate the technologies in the laboratory. It has been possible, through consistent optimisation of the material composition, electrode composition and electrode microstructures, to improve the performance characteristics of membrane electrode assemblies (MEAs) for PEM fuel cells at high current densities. Environmental protection and recycling factors play a particularly important role in the development of fluorine-free components for fuel cells.



„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 facilities and metal-air cells."

// Dr. Ludwig Jörissen, Head of Department
E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de, Phone: +49 731 9530-605



// AutoStack-Industrie

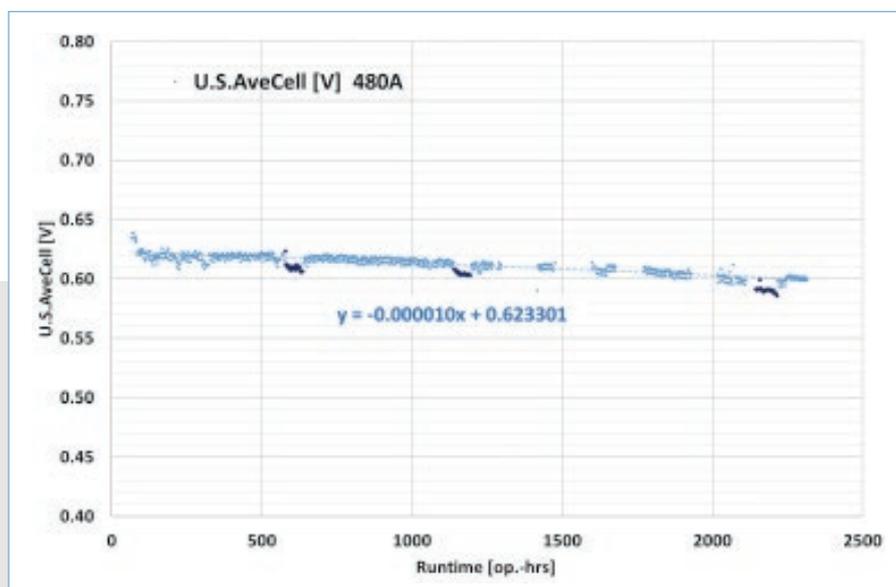
Das vom Bundesverkehrsministerium geförderte Verbundprojekt „AutoStack-Industrie“ mit zehn Industriepartnern wurde zur Entwicklung eines serienfertigungstauglichen Hochleistungs-Brennstoffzellenstacks für Automobilanwendungen ins Leben gerufen und im Jahr 2022 erfolgreich abgeschlossen.

Der entwickelte Brennstoffzellenstack erfüllt die gesetzten Leistungsziele mit 86,4 Kilowatt im nominalen Arbeitspunkt und 97,4 Kilowatt Spitzenleistung. Der Zellblock (ohne Endplatten) hat ein Volumen von 12,82 Litern und weist zu Beginn der Lebensdauer eine Leistungsdichte von 6,7 kW·l⁻¹ im Nennarbeitspunkt und 7,6 kW·l⁻¹ unter Spitzenlastbedingungen auf. Hauptaufgabe des ZSW war es, Strömungsmodellierungsarbeiten durchzuführen, sowie das Testen der Stacks. Die Abbildung unten zeigt das Ergebnis eines Lebensdauerests in einem dynamischen Lastzyklus. Die gemessene Spannungsdegradationsrate von 10 µV·h⁻¹ lässt eine Lebensdauer von mehr als 6.000 Stunden im Pkw-Fahrbetrieb erwarten und erfüllt die im Projekt vereinbarten Spezifikationen. Während der in der Abbildung unten dunkel markierten Zeiten wurde die Betriebstemperatur erhöht. Die Lücken repräsentieren den Betrieb mit signifikant veränderten Betriebsbedingungen sowie die Durchführung von Diagnoseprogrammen.

// Fuel cell stack project

Funded by the Federal Ministry of Transport, the “AutoStack-Industrie” joint project with 10 industry partners was launched to develop a high-performance fuel cell stack suitable for series production for automotive applications and was successfully completed in 2022.

The fuel cell stack which was developed meets the performance targets with an output of 86.4 kilowatts at the nominal operating point and 97.4 kilowatts peak power. The cell block (excluding end plates) has a volume of 12.82 litres and, at the beginning of its service life, a power density of 6.7 kW·l⁻¹ at the nominal operating point and 7.6 kW·l⁻¹ under peak load conditions. The main brief of the ZSW was to carry out flow modelling research and to test the stacks. The diagram below shows the result of a service life test in a dynamic load cycle. The measured voltage degradation rate of 10 µV·h⁻¹ is indicative of an expected service life of more than 6,000 hours in a driven car and meets the specifications agreed in the project. The operating temperature increased during the shaded periods in the diagram below. The gaps represent operation with significant changes to operating conditions and the execution of diagnostic programs.



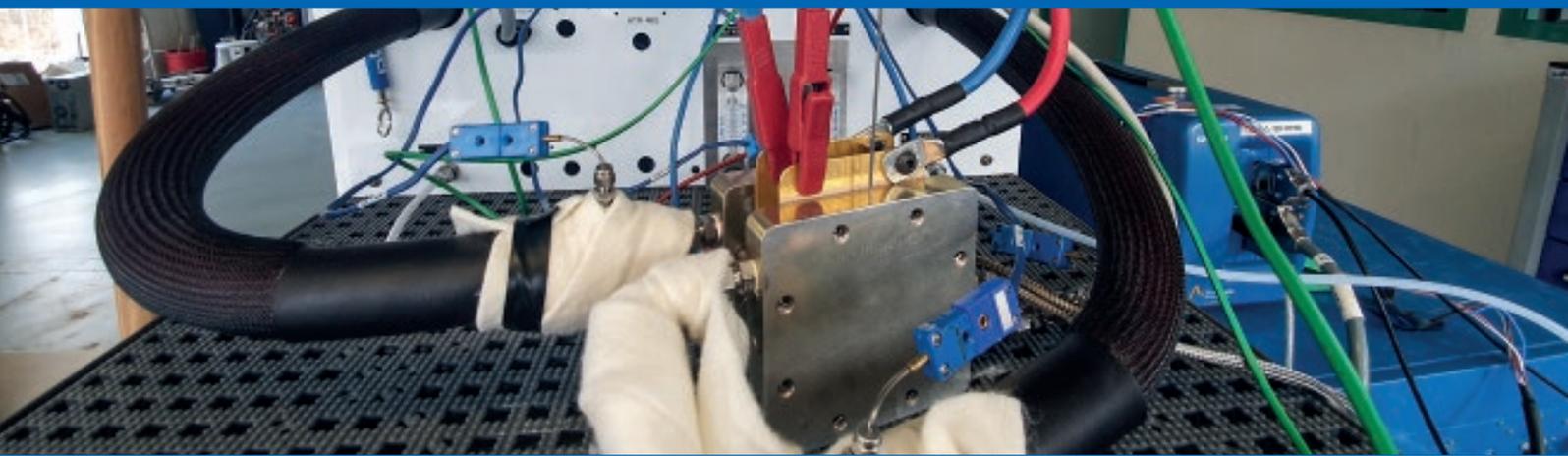
// AutoStack-Industrie: Lebensdauer-Stacktest im dynamischen Lastzyklus.

// Service life test in a dynamic load cycle in fuel cell stack project “AutoStack-Industrie”.

// Dr. Ludwig Jörissen

E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-605

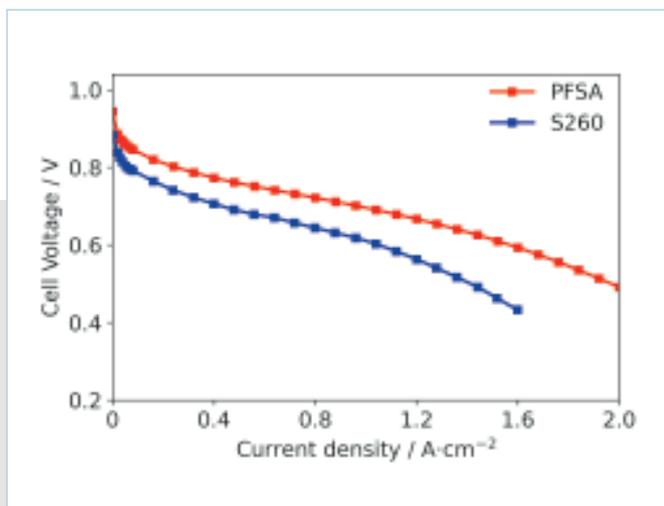


// Fluorfreie Ionomere für Brennstoffzellenkathoden

Die Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) von PEM-Brennstoffzellen nach dem Stand der Technik werden mit Polymeren perfluorierter Sulfonsäure (PFSA) hergestellt. Infolge ihrer Beständigkeit ist es möglich, die Lebensdauernanforderungen für Brennstoffzellen für Anwendungen im Verkehr zu erfüllen. Andererseits führt gerade der Fluorgehalt und die chemische Beständigkeit fluorierter Verbindungen zu Herausforderungen in Bezug auf die Wiederverwertung. Im Rahmen des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekts „Beyond-PFSA“ wird der Einsatz fluorfreier Materialien erforscht.

In einem Vorgängerprojekt konnten deren Ionenleitfähigkeit und ihre Stabilität unter Brennstoffzellenbedingungen bereits nachgewiesen werden. Die entwickelten Materialien weisen eine sehr geringe Durchlässigkeit für Wasserstoff und Sauerstoff auf. Diese für den Einsatz als Elektrolytmembran erwünschte Eigenschaft erschwert jedoch die Verwendung in Elektroden. Im Projektverlauf konnte nun erstmals eine Elektrode mit wettbewerbsfähigen Leistungsdaten unter Verwendung des fluorfreien Ionomers hergestellt werden.

Die Grafik unten zeigt den Vergleich der Kennlinien einer konventionell hergestellten MEA mit einer MEA mit fluorfreier Kathode. In der Abbildung ist die verringerte Permeabilität des fluorfreien Ionomers durch das frühere Einsetzen von Stofftransporthemmungen erkennbar. Weitere Optimierungsarbeiten an Zusammensetzung und Mikrostruktur zur Leistungssteigerung sind Gegenstand der weiteren Arbeiten im Projektverlauf.



// Fluorine-free ionomers for fuel cell cathodes

The membrane electrode assemblies (MEAs) of the latest generation of PEM fuel cells are made with polymeric perfluorosulfonic acids (PFSA). Due to their durability, it is possible to meet the service life requirements for fuel cells for transportation applications. It is precisely the fluorine content and chemical resistance of fluorinated compounds, however, which present challenges in relation to recycling. The use of fluorine-free materials is the subject of research in the “Beyond-PFSA” project funded by the Federal Ministry of Education and Research.

As a result of work carried out in a previous project, it had already been possible to demonstrate their ionic conductivity and stability under fuel cell conditions. The materials which have been developed have a very low level of permeability to hydrogen and oxygen. This property may be desirable for operation as an electrolyte membrane but it makes use in electrodes more difficult. It has now proved possible for the first time, in the course of the project, to produce an electrode with competitive performance data using the fluorine-free ionomer.

The graph below shows a comparison of a conventionally manufactured MEA with an MEA with a fluorine-free cathode. The diagram illustrates the reduced permeability of the fluorine-free ionomer due to the earlier onset of mass transfer inhibition. The optimisation of the composition and microstructure in order to increase performance will be the subject of further work in the course of the project.

// Strom-Spannungskurvenvergleich einer MEA mit einer mit fluorfreiem Ionomer gebundenen Kathode zu einer konventionell hergestellten MEA. Man erkennt den früheren Einsatz von Massentransporteffekten.

// Current density and voltage graph comparing an MEA with a cathode bonded with fluorine-free ionomer to a conventionally produced MEA and showing the earlier onset of mass transportation effects.

// Didem Yazili

E-mail: didem.yazili@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-210



// Methodik zur Messung der Katalysatoraktivität

Die Aktivität und die Leistungscharakteristik von Brennstoffzellen-elektroden wird wesentlich von den Eigenschaften der eingesetzten Platinkatalysatoren bestimmt. Eine wichtige Kenngröße ist die unter genau definierten experimentellen Bedingungen bestimmte maximale massenbezogene Sauerstoffreduktionsaktivität. Durch Vergleich der mit denselben Katalysatoren erzielbaren Aktivität im Brennstoffzellenbetrieb kann der tatsächliche Platinnutzungsgrad in der Anwendung bestimmt werden.

Hierzu wurde eine Laminarflusszelle mit genau definierten Strömungsverhältnissen entwickelt und getestet. Die Zelle weist eine vernachlässigbare Stofftransporthemmung und ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis auf. Die Zelle eignet sich zum Betrieb bis zu einer Temperatur von 100 Grad Celsius und einem Druck von 3 Bar. Unter optimierten, wohldefinierten Versuchsbedingungen konnten damit hochwertige experimentelle Daten zur Katalysatoraktivität kommerziell verfügbarer Katalysatoren gewonnen und mit den Daten neu entwickelter Katalysatoren verglichen werden.

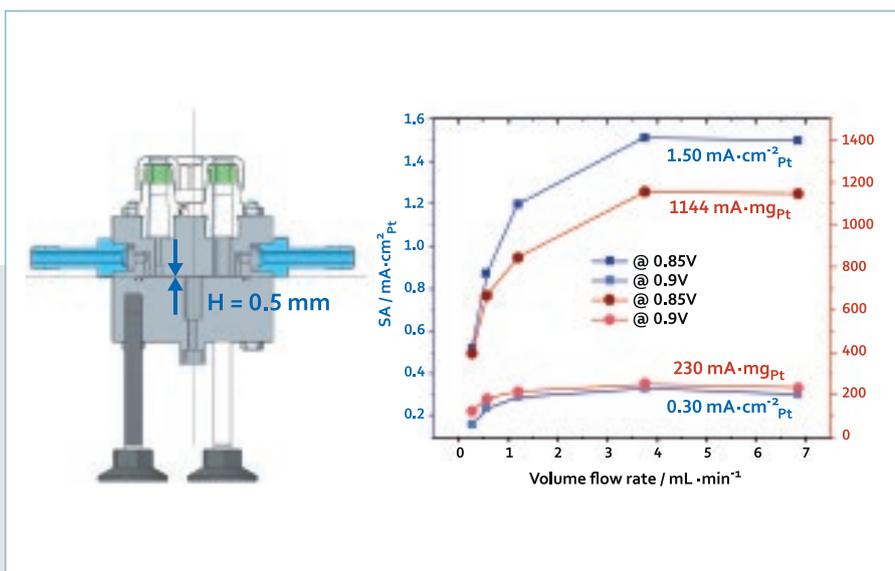
Durch Vergleich der Katalysatoraktivitäten in der Laminarflusszelle und im Brennstoffzellenbetrieb kann das durch Elektrodenherstellungstechnik erschließbare Optimierungspotenzial ermittelt werden. Die Abbildung unten zeigt die massen- und oberflächenspezifischen Sauerstoffreduktionsaktivitäten eines Platinkatalysators bei Elektrodenpotenzialen von 0,85 V und 0,9 V vs. das Potenzial der reversiblen Wasserstoffelektrode.

// Catalyst activity measurement methods

The activity and performance characteristics of fuel cell electrodes are essentially dictated by the properties of the platinum catalysts used. One important parameter is the maximum mass-related oxygen reduction activity identified under precisely defined experimental conditions. The actual degree of platinum utilisation in the application can be identified by comparing the activity achievable with the same catalysts in fuel cell operation.

A laminar flow cell with precisely defined flow conditions was developed and tested for this purpose. The cell exhibits a negligible level of mass transfer inhibition and an excellent signal-to-noise ratio. The cell is suitable for operation up to a temperature of 100 °C and a pressure of 3 bar. It was possible to obtain good experimental data on the activity of commercially available catalysts under well-defined and optimised test conditions and to compare the results with the data of newly developed catalysts.

A comparison of the catalyst activities in the laminar flow cell and in fuel cell operation enables a calculation of the potential for optimisation which can be unlocked through electrode manufacturing technology. The diagram below shows the mass-related and surface-specific oxygen reduction activities of a platinum catalyst at electrode potentials of 0.85 V and 0.9 V as compared to the potential of the reversible hydrogen electrode.



// Laminarflusszelle (links) und massen- bzw. oberflächenspezifische Sauerstoffreduktionsaktivität eines kommerziellen Platinkatalysators bei verschiedenen Elektrodenpotenzialen (rechts).
// Laminar flow cell (left) and mass-related and surface-specific oxygen reduction activity of a commercial platinum catalyst at different electrode potentials (right).

// Dr. Sylvain Brimaud
E-mail: sylvain.brimaud@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-615

// Brennstoffzellen Stacks (ECB)

Fuel Cell Stacks (ECB)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECB ist spezialisiert auf die Entwicklung von PEM-Brennstoffzellen (PEMFC). Im Zentrum stehen die Konstruktion, Charakterisierung und Simulation von Brennstoffzellenstacks und Komponenten im Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 100 kW_{el}. Eine weitere Kernkompetenz liegt im Bau von Prototypen und auf der Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien.

Im Bereich Brennstoffzellenoptimierung stehen die Themen Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit im Zentrum. Das umfasst die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Außerdem entwickelt ECB manuelle und automatisierte Herstelltechniken für PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks, auch für automobiltaugliche Brennstoffzellen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Entwicklungsarbeiten bei der Stackassemblierung im Rahmen des HyFaB-Projekts.

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze ein. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen lässt sich mittels einer μ -CT-Anlage untersuchen und validieren. Damit können wir die Strukturen von Gasdiffusionslagen auch im komprimierten Zustand einschließlich Wasserhaushalt abbilden. Ergänzend stehen am ZSW vorhandene Analysetechniken (z. B. FIB-SEM) sowie mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Verfügung, deren zeitliche und räumliche Auflösungen zu den weltweit besten gehören.

// Our core areas of expertise

The ECB department specialises in the development of PEM fuel cells. The focus is on the design, characterisation and simulation of fuel cell stacks and components in the power range of a few watts right through to 100 kW_{el}. Other key specialisms include the construction of prototypes and the development of manufacturing and testing technologies.

The issues in focus in fuel cell optimisation are performance, service life, efficiency and compactness. This involves investigating and forecasting ageing processes and analysing faults. The ECB department also develops manual and automated manufacturing technologies for PEMFC components, cells and stacks, and for automotive-grade fuel cells. One aspect of particular importance here is the development work on stack assembly in the HyFaB project.

Component structures and operating conditions can be optimised quickly through the modelling and simulation of processes in fuel cells. This also includes the development and establishment of completely new approaches. The simulation results are verified using robust hardware and conducting experiments under realistic conditions. The water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers can be examined and validated using a μ -CT system. This allows us to map the structures of gas diffusion layers under compression, including water content. Analytical methods in use at the ZSW (e.g. FIB-SEM) and neutron and synchrotron radiography and tomography techniques developed with the Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) are also available. The spatial and temporal resolution of these methods rank 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.“

// Dr. Joachim Scholta, Head of Department
E-mail: joachim.scholta@zsw-bw.de, Phone: +49 731 9530-206

“The focus of our work is the optimisation of fuel cells and all components in terms of design, manufacture, performance and service life.”



// Europäisches Projekt zeigt Potenzial zukünftiger Brennstoffzellenkonzepte

Das ZSW arbeitet im europäischen Kooperationsprojekts „DOLPHIN“ mit Partnern aus Industrie und Forschung an der Entwicklung neuartiger, disruptiver Zellkonzepte für Brennstoffzellen-stacks*. So soll durch die Anwendung innovativer Fertigungsverfahren, verbesserter Materialien und neuer Designideen eine Verdopplung der Leistung der Zellen bezogen auf den Stand der Technik 2017 erreicht werden. Der Fokus des Projekts liegt auf der automobilen Anwendung, wo durch die Steigerung der Leistung pro Zellfläche eine deutliche Kostenreduktion durch Materialeinsparung erwartet wird. Die entwickelten Konzepte lassen sich auch auf andere Anwendungsbereiche übertragen, um Effizienz und Leistung zu steigern sowie Kosten zu senken.

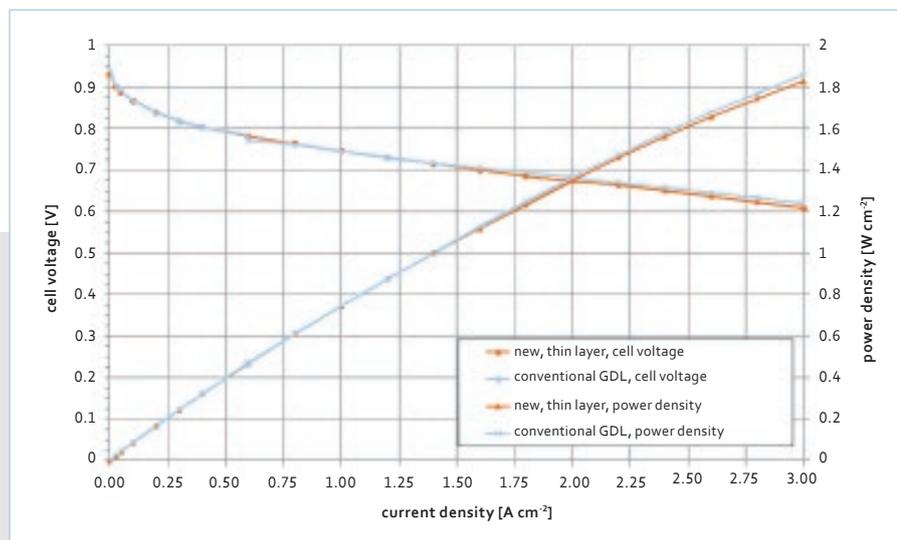
Den Projektpartnern ist es 2022 gelungen, mit Hilfe additiver Fertigungstechnologie ein sehr feines Gasverteilerfeld für die Zellen zu realisieren. In Kombination mit weiteren fortschrittlichen Komponenten zeigte sich bei Tests am ZSW erstmals eine auf die Aktivfläche bezogene Leistungsdichte von $2,0 \text{ W/cm}^2$ in einem Vollzellformat. Die als Projektziel geforderte Verdopplung konnte somit realisiert werden. Am ZSW wurde auch eine Gasdiffusionslage hergestellt, die wesentlich dünner ist als die herkömmlichen Materialien und ohne die sonst übliche Schicht aus Carbonfasern auskommt. Sie ist damit potenziell mit wesentlich weniger Energieeinsatz und günstiger herzustellen und zeigt bei Tests im Vollzellformat eine äquivalente Leistungsfähigkeit im Vergleich zu konventionellen Materialien.

// European project highlights potential of future fuel cell designs

The ZSW is working with partners from industry and research on the development of new kinds of disruptive cell designs for fuel cell stacks in the European collaboration project "DOLPHIN"*. The aim is to double the performance of the cells as compared to the 2017 level through the use of innovative manufacturing methods, improved materials and new design ideas. The focus of the project is on automotive applications where the increase in performance per cell area is expected to result in a significant cost reduction by saving on materials. Once developed, the concepts can also be transferred to other fields of application in order to increase efficiency and performance and reduce costs.

The project partners succeeded in developing a very fine gas distribution panel for the cells in 2022 with the help of additive manufacturing technology. In combination with other advanced components, a power density of 2.0 W/cm^2 in relation to the active surface in a full cell format was achieved for the first time in tests at the ZSW. This represented the doubling stated as a project aim. A gas diffusion layer was also produced at the ZSW which is significantly thinner than conventional materials and does not require the usual layer of carbon fibres. It can therefore potentially be produced with significantly less energy and at less expense. This indicates a performance equivalent to conventional materials in tests in full cell format.

*This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (now Clean Hydrogen Partnership) under Grant Agreement No 826204. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.



// Strom-Spannungs-Kurve und Leistungsdichte einer Full-Size-DOLPHIN-Zelle im Vergleich zu einer Zelle mit konventioneller GDL.

// Current-voltage graph and power density of a full-size DOLPHIN cell with a newly developed thin gas diffusion layer (GDL) compared to a cell with conventional GDL.

// Dr. Florian Wilhelm
E-mail: florian.wilhelm@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-203



// Generischer Brennstoffzellenstack: Entwicklungsplattform für die Industrie

Am ZSW in Ulm entsteht die Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen (HyFaB), in der die notwendigen Prozesse für eine Großserienproduktion von Brennstoffzellen entwickelt werden. In Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wurde im Rahmen eines vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten HyFaB-Projekts ein Design für einen generischen Brennstoffzellenstack als offene Entwicklungsplattform realisiert. Die Spezifikationen sind in einem Vorprojekt mit der Automobil- und Zulieferindustrie erarbeitet worden. Größe und Design des Stackkonzepts entsprechen, was die Leistungsdichte angeht, den im Automobilbereich eingesetzten Brennstoffzellensystemen. Die Leistung des Stacks ist bis zu 150 kW ausgelegt.

Im Projekt wurden alle relevanten Teile des Zelldesigns wie Portkanalgeometrie, Aktivbereich und Verteilerbereich mittels geeigneter CFD-Simulationen unter Verwendung von ANSYS Fluent® untersucht. Die Simulationen wurden gleichermaßen für die Luft-, Wasserstoff- und Kühlseite durchgeführt. Die Basis bilden die Betriebsrandbedingungen aus dem EU-finanzierten AutoStackCore-Projekt. Zu den Bipolarplatten wurde ein darauf abgestimmtes Balance-of-Stack-Konzept entworfen. Dieses beinhaltet die Stromabnehmer, Verpressplatten, eine über metallische Bänder und Tellerfedern als Längenausgleichseinheiten realisierte Verspanneinheit sowie die Endplatten inklusive Medienzuführungen. Für die Anbindung an den Teststand wurde zudem eine Anschlussvorrichtung entwickelt, um Stapel schnell und einfach anzuschließen und zu entkoppeln. Das Funktionsmuster wird Anfang 2023 für Forschungsprojekte verfügbar sein und Unternehmen Zugang in die Branche ermöglichen.

// Generic fuel cell stack: open development platform for industry

The research factory for hydrogen and fuel cells (HyFaB) emerging at the ZSW in Ulm will be a base for the development of the necessary processes for the large-scale production of fuel cells. A design for a generic fuel cell stack in the form of an open development platform was the result of work done in cooperation with an industry partner in a HyFaB project funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment. The specifications were worked out in a prior project with the automotive industry and its component suppliers. In terms of power density, the stack size and design correspond to the fuel cell systems used in the automotive sector. The stack is designed for an output of up to 150 kW.

All the relevant parts of the cell design, such as port channel geometry, active zone and distribution area, were studied in the project by means of suitable CFD simulations using ANSYS Fluent®. The simulations were carried out in equal measure for air, hydrogen and cooling systems based on the operating boundary conditions arising from the EU-funded AutoStackCore project. A matching balance-of-stack design was issued for the bipolar plates. This includes the electricity consumers, compression plates, length compensation units made from metal strips and disc springs acting as a tensioning unit, and the end plates complete with media supply lines. A device was also developed for connection to the test rig in order to facilitate the rapid and simple connection and disconnection of stacks. The working model will be available for research projects in early 2023 and will give enterprises access to the industry.



// CAD-Darstellung des generischen Stacks, einschließlich Verpressungseinheit und Medienanschlüssen.

// CAD design of the generic stack, including compression unit and media connections.

// Frank Häußler

E-mail: frank.haeussler@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-791

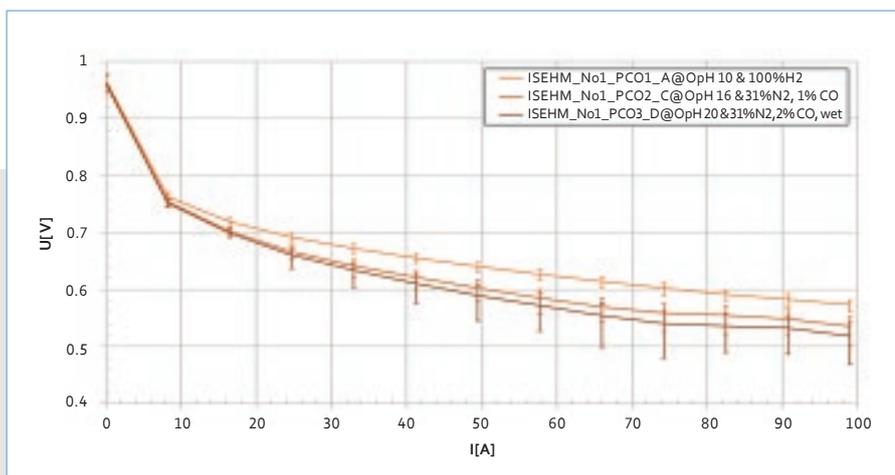


// Industrialisierung eines stationären Stromerzeugers mit Brennstoffzelle

Ziel des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Vorhabens „Industrialisierung eines Stromerzeugers mit Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle und integriertem Methanolreformer“ (ISEHM) ist die marktfähige Serienfertigung von 5-kW-Stromgeneratoren mit Brennstoffzellentechnologie, basierend auf Hochtemperatur-PEM-Technologie (HT-PEM) und einem integrierten Methanolreformer. Damit soll die Brücke zwischen erfolgreicher Prototypentwicklung und Musterfertigung zu einem wirtschaftlich tragfähigen Geschäft geschlagen werden. Sowohl die bestehenden Produkte als auch die Herstellverfahren sollen unter Kosten- und Qualitätsgesichtspunkten optimiert werden. Zu den Aufgaben des ZSW gehören die Modellierung des Zeldesigns, die Optimierung der Flowfield- und Portkanalgeometrien des Stacks, die Charakterisierung und der Dauertest des entwickelten HT-PEMFC-Stacks sowie die Ex-situ-Charakterisierung von neuen und betriebenen MEA-Einheiten. Im Rahmen des Projekts wurde unter anderem mit CFD-Simulationen eine optimierte Verteilerfeldgeometrie geschaffen. Mittels Portkanalsimulation konnte eine Gleichverteilung der Medienströme über den Stack erreicht werden. Dabei wurde eine hohe Gleichförmigkeit der gasförmigen Medienverteilung bestätigt. Für die Konstruktion langlebiger HT-PEM-Brennstoffzellen ist eine genaue Kenntnis des Verhaltens der Komponenten unerlässlich. Hierzu wurden unter anderem Kraftweg-, Kraft-Leitfähigkeits-Messungen sowie Wärmeleitfähigkeitsmessungen durchgeführt. Die Abbildung gibt die Flächenwiderstände als Funktion des Anpressdrucks für verschiedene Komponenten wieder. Im Rahmen der Testaktivitäten wird im weiteren Projektverlauf ein 30-zelliger Stack hinsichtlich des Standzeitverhaltens unter erschwerten Betriebsbedingungen untersucht.

// Industrial roll-out of a stationary power generator with fuel cell

The aim of the project on the industrial roll-out of a power generator with high-temperature PEM fuel cell and integrated methanol reformer (ISEHM), funded by the Federal Ministry of Economic Affairs, is the commercial viability of 5-kW power generators with fuel cell technology for series production, based on high-temperature PEM technology (HT-PEM) and integrated methanol reformer. This is intended to bridge the gap between successful prototype development and sample production to arrive at an economically viable business. The goal is to optimise both the existing products and the manufacturing processes from the point of view of cost and quality. The ZSW remit includes the modelling of the cell design and optimisation of the flow field and port channel geometries of the stack, the characterisation and endurance testing of the developed HT-PEMFC stack and the ex-situ characterisation of new and operated MEA units. An optimised distribution panel geometry was developed in the project by various means, including CFD simulations. It was possible by means of port channel simulation to achieve an equal distribution of the liquid flows across the stack. A high degree of uniformity of the gaseous media distribution was confirmed in the process. An exact knowledge of the behaviour of the components is essential for the construction of long-lasting HT-PEM fuel cells. Various measurements were carried out to this end, including force-displacement measurements, force-conductivity measurements and thermal conductivity measurements. The diagram shows the surface resistance values as a function of the contact pressure for various components. As the project continues, a 30-cell stack will be tested to examine its service life behaviour under difficult operating conditions.



// Strom-Spannungs-Kennlinien eines 30-zelligen HT-PEMFC-Stacks bei Testbeginn (BoT).

// Current-voltage characteristics of a 30-cell HT-PEMFC stack at the beginning of the test (BoT).

// Dr. Joachim Scholta

E-mail: joachim.scholta@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-206

// Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECS betreibt seit 2001 ein Brennstoffzellentestzentrum, das bis Mitte 2023 mit 50 Testständen bis 250 Kilowatt belegt sein wird. 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 über 600.000 Betriebsstunden (Stand 12/2022).

In die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen und Systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen sowie für Fahrzeuge fließen jahrzehntelange Forschungsarbeit und Industrieerfahrung ein. Das Leistungsspektrum umfasst marktreife Prototypen einschließlich der Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. 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.

Untersuchungen zum Thema Wasserstoff als Kraftstoff bilden den dritten Schwerpunkt der Arbeiten des Fachgebiets. Das Team mit seiner Erfahrung in Brennstoffzellentechnik und der Nutzung von Wasserstoff ist 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.

// Our core areas of expertise

The ECS department has been operating a fuel cell test centre since 2001 which will accommodate 50 test rigs of up to 250 kilowatts by the middle of 2023. The focus is on professional endurance tests on fuel cell stacks, systems and system components. The tests provide data for the evaluation of ageing, service life and robustness. The appraisal 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 600,000 operating hours (as at 12/2022).

Many decades of research work and industrial experience have gone into developing fuel cell systems and components for stationary systems, on-board and emergency power supply systems and vehicles. The range of services extends to fully fledged prototypes including control and hybridisation with batteries and DC/AC converters. Safety assessments, packaging feasibility studies and product certification processes are also carried out. These are usually performed on the instructions of industrial customers or through publicly funded projects, the results of which are available to the general public.

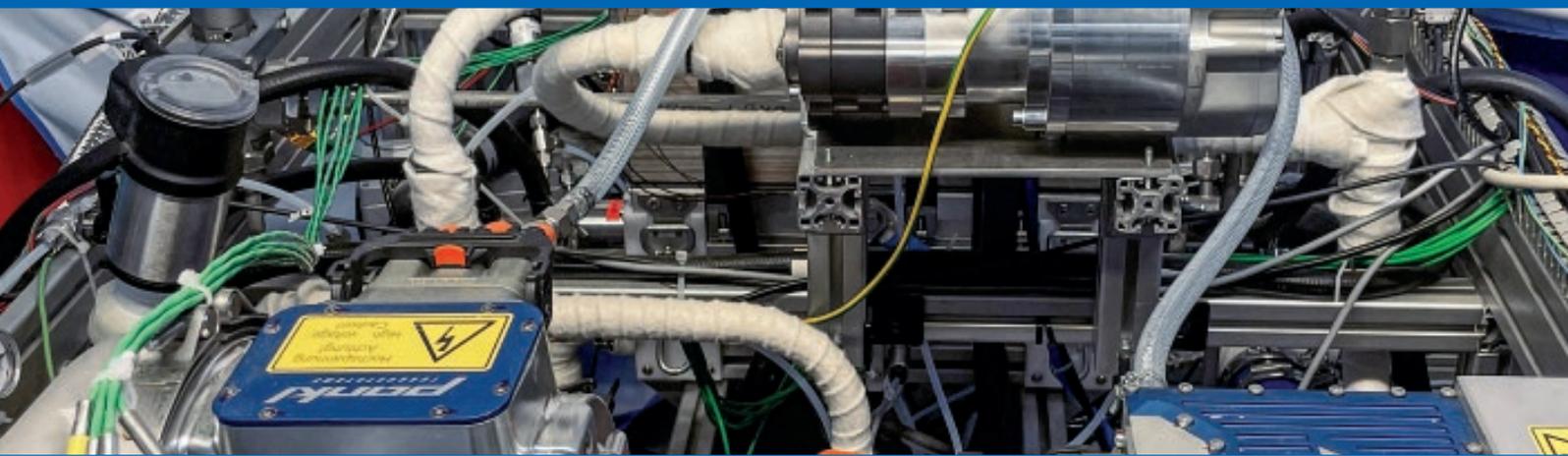
In-depth studies on the subject of hydrogen as a fuel form the third focus of the research work in the department. Given its experience in fuel cell technology and in the use of hydrogen, the team is involved in several projects working towards the development of the European hydrogen infrastructure. These revolve around proof of compliance with international fuelling standards for hydrogen filling stations with regard to their acceptance in accordance with DIN ISO 19880 and around conformity with the hydrogen quality required for fuel cell operation pursuant to ISO 14687-2.



„Langfristig sind die weltweiten Klimaziele ohne Wasserstofftechnologien nicht zu erreichen. Jetzt geht es darum, den Wasserstoff in unseren Alltag zu integrieren.“

// Dr. Alexander Kabza, Head of Department
E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de, Phone: +49 731 9530-832

"The global climate goals cannot be achieved in the long term without hydrogen technologies. What we need to do now is to integrate hydrogen into our everyday lives."



// Brennstoffzelltechnologie von der Komponente zum Betrieb

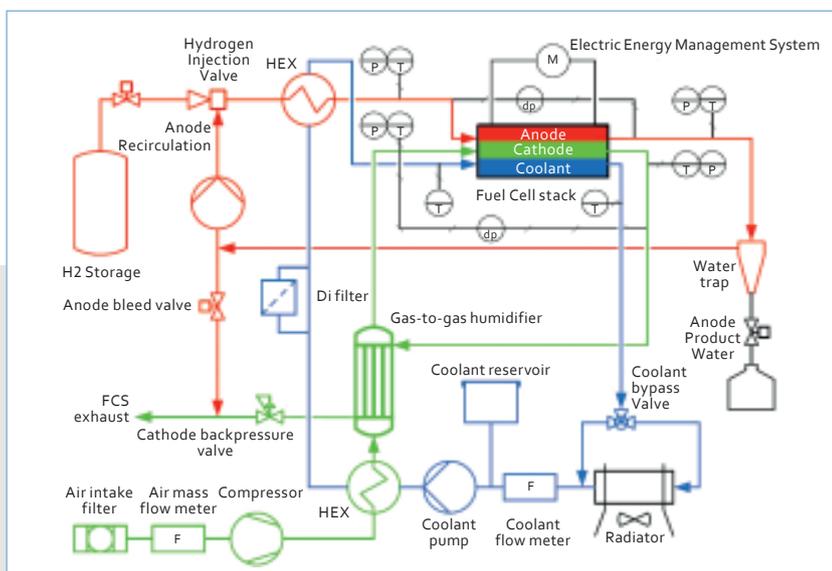
Im Unterschied zum Batteriesystem erfordert die Medienbereitstellung für den Stack im Brennstoffzellsystem eine eigene Peripherie. Für den Fahrzeugeinsatz wird ein System aus Komponenten wie Verdichtern, Wärmetauschern und Druckregelventilen benötigt, um die dem jeweiligen Betriebspunkt entsprechenden Betriebsbedingungen einzustellen. Einige Entwicklungen aus dem Bereich der Verbrennungsmotoren können dabei auf Brennstoffzellsysteme übertragen werden. In den Anforderungen an die Komponenten unterscheiden sich die Antriebstechnologien jedoch teilweise stark. Die Leistungscharakteristik der Peripherie wirkt sich wesentlich auf die Effizienz und Lebensdauer des Gesamtsystems aus.

Aufgabe des ZSW ist es, die Industrie im disruptiven Kontext der Brennstoffzelltechnologie bei der Definition, Verifikation und Validierung der Anforderungen an neue Komponenten zu unterstützen. Am eigens entwickelten Systemteststand können Komponenten verschiedener Leistungsklassen flexibel eingebunden und getestet werden. Das agile Testumfeld ermöglicht eine schnelle und individuelle Anpassung der Software- und Hardwarekonfiguration an vielfältige Schnittstellen und Betriebsparameter. Die gesammelten Testdaten fließen zudem anonymisiert in die Entwicklung eigener, fortschrittlicher Systemmodelle ein. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit werden bestehende Implementierungen von Open-Source-Modellen weiterentwickelt, um künftig die Auslegungs- und Betriebsstrategien von Brennstoffzellsystemen für unterschiedlichste Anwendungsbereiche zu optimieren.

// Fuel cell technology from the component to operation

In contrast to the battery system, the media supply for the stack in the fuel cell system requires its own periphery. For vehicle use, a system of components like compressors, heat exchangers and pressure control valves is required in order to match the operating conditions to the respective operating point. Some developments can be taken from the combustion engine industry and transferred to fuel cell systems. The drive technologies sometimes vary greatly, however, in terms of the standards required of the components. The performance characteristics of the peripheral equipment have a significant impact on the efficiency and service life of the overall system.

The task of the ZSW is to support the industry within the disruptive context of fuel cell technology with the definition, verification and validation of the requirements placed on new components. There is scope for flexible integration of components of different performance classes, for example, and facilities for their testing on the specially developed test rig. The agile test environment enables rapid customisation of the software and hardware configuration for compatibility with a diverse range of interfaces and operating parameters. The test data which have been collected are also used in anonymous form in the development of advanced in-house system models. The subject of a scientific paper is the further development of existing implementations of open-source models in order to optimise the design and operating strategies of fuel cell systems for a wide variety of application areas in the future.



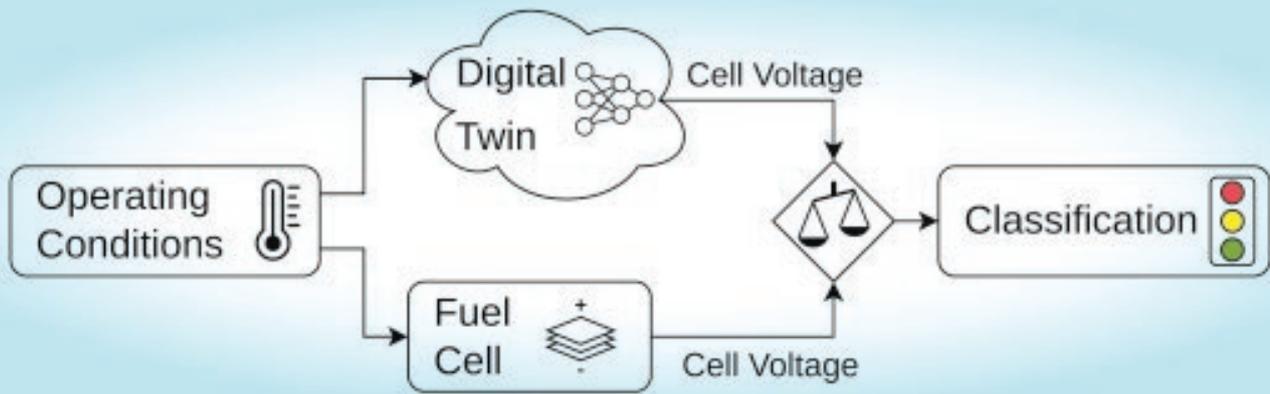
// Exemplarischer Aufbau eines Brennstoffzellsystems für mobile Anwendungen.

// Example design of a fuel cell system for mobile applications.

// Dr. Alexander Kabza

E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-832



// Digitale Zwillinge für Brennstoffzellen

Neben der Überwachung der Betriebsbedingungen spielt die Überwachung des Brennstoffzellenstapels eine weitere zentrale Rolle. Aufgrund der voranschreitenden Verbesserung der Brennstoffzellenstapel erfordern speziell die Lebensdauertests mit Betriebszeiten über tausende von Stunden immer bessere Überwachungsmethoden. Mit ihnen sollen unvorhergesehene äußere Einflüsse ohne direkten Messwert wie beispielsweise Kontaminationen frühzeitig und präzise erkannt und somit Folgeschäden abgewendet werden.

Eine Möglichkeit hierfür ist die Überwachung des Brennstoffzellenstapels mit Hilfe eines digitalen Zwillings auf der Basis neuronaler Netze. Basierend auf den aktuellen und den vergangenen Betriebsbedingungen des Brennstoffzellenstapels berechnet der digitale Zwilling eine probabilistische Vorhersage der aktuellen Zellspannung des Stapels. Zu starke Abweichungen von Messung und Vorhersage deuten auf ein Problem mit dem Brennstoffzellenstapel hin. Eine schematische Darstellung dieser Methodik zeigt die Grafik oben.

Die unten stehende Abbildung zeigt einen solchen Fall, bei dem nach 2.700 Betriebsstunden aufgrund eines Vorfalls die Zellspannung des Stapels abnormal stark abfiel. Infolgedessen steigt die Abweichung zwischen Vorhersage und Messungen über den Klassifikationsgrenzwert, wodurch weitere Messpunkte als abnormal klassifiziert werden.

Nach der erfolgreichen Erprobung dieser KI-basierten Überwachung müssen die Algorithmen nun automatisiert werden, sodass die auf den Prüfständen generierten Messungen in Echtzeit plausibilisiert werden können. Mit diesen Maßnahmen wird ECS für das weiter wachsende Testaufkommen in den kommenden Jahren bestens vorbereitet sein.

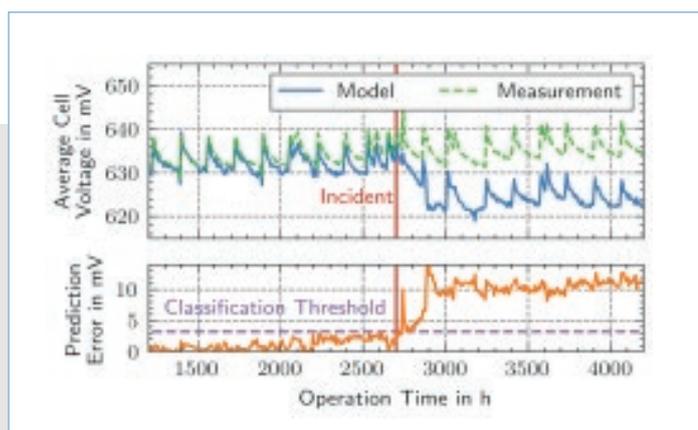
// Digital twins for fuel cells

In addition to the monitoring of the operating conditions, the monitoring of the fuel cell stack has a key role to play. Given the progress being made in the improvement of fuel cell stacks, there is a need for better and better monitoring methods, especially for the endurance tests with operating times amounting to thousands of hours. They allow early detection and precise identification of unforeseen external influences without direct measurement, such as contamination, thereby averting consequential damage.

One possible option is to monitor the fuel cell stack using a digital twin based on neural networks. Based on the present and past operating conditions of the fuel cell stack, the digital twin calculates a probabilistic prediction of the current cell voltage of the stack. Too great a variation between the measurement and prediction indicates a problem with the fuel cell stack. This methodology is illustrated in the diagram above.

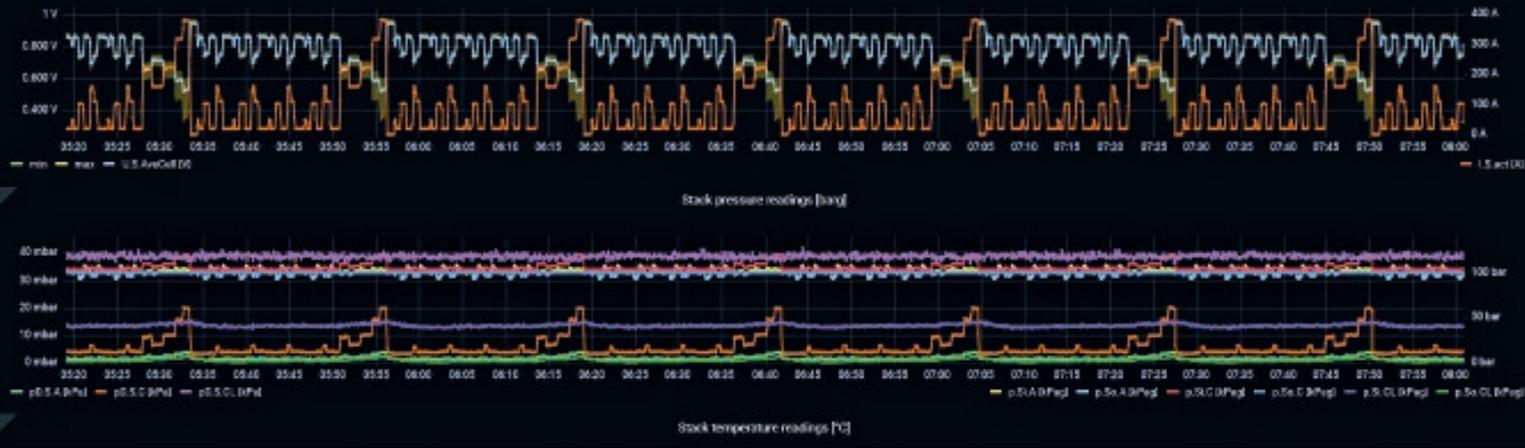
The diagram below shows a case of this kind where there was an abnormally sharp drop in the cell voltage of the stack after 2,700 hours of operation due to an incident. As a result, the difference between prediction and measurement increases above the classification limit, causing more measurement points to be classified as abnormal.

Having successfully trialed this AI-based monitoring process, the algorithms must now be automated so that the measurements generated on the test rigs can be checked for plausibility in real time. Equipped with these tools, the ECS department is fully prepared for the growing number of tests in the coming years.



// Vergleich von Modellvorhersage und Messung. Nur kurze Zeit nach dem rot markierten Vorfall überschreitet die Abweichung den Grenzwert, wodurch alle folgenden Messungen als abnormal erkannt werden.
 // Comparison of model prediction and measurement. Only a short time after the incident marked by the red line, the limit is exceeded, causing all subsequent measurements to be judged abnormal.

// Dr. Alexander Kabza
 E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-832



// Überwachung von Brennstoffzellenprüfständen mit künstlicher Intelligenz

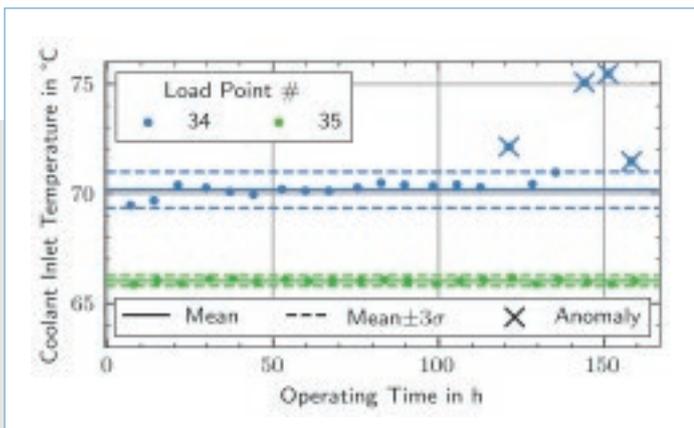
Der Betrieb von Brennstoffzellenstapeln wird auf Testständen meist mithilfe fest eingestellter Alarmgrenzwerte für bestimmte Betriebsparameter in der Prüfstandssoftware überwacht. Sobald ein solcher Grenzwert über eine bestimmte Zeit über- oder unterschritten wird, kommt es zur Anzeige einer Warnung oder zur Abschaltung. Aufgrund der breit gefächerten Betriebsbedingungen der Stapel funktioniert diese Art der Überwachung jedoch nur für die extremen maximalen und minimalen Betriebsbedingungen. Zu grobe Grenzen verhindern dabei die Erkennung kleinerer Fehler, wohingegen zu feine Grenzen die Tests unnötig oft unterbrechen. Gerade für die Industrialisierung ist es jedoch wichtig, dass der Dauerbetrieb stabil ist und richtig durchgeführt wird.

Am ZSW wurde eine neuartige Überwachung der Teststände mithilfe von künstlicher Intelligenz entwickelt. Diese erlaubt eine adaptive, mitlernende Überwachung aller relevanten Betriebsparameter. Aufgrund des zyklischen Betriebs bei Lebensdauertests werden dazu die eingestellten Betriebsbedingungen bei einem Lastpunkt mit den vergangenen Betriebsbedingungen desselben Lastpunkts verglichen. Ein Beispiel dafür ist in der untenstehenden Abbildung dargestellt. Aufgrund der Inbetriebnahme eines benachbarten Prüfstands war in diesem Beispiel die Kühlleistung zurückgegangen, weshalb die Kühlmiteleintrittstemperatur anstieg. Der Algorithmus klassifiziert diese Ausreißer folgerichtig als Anomalien. Damit kann sichergestellt werden, dass die Messungen bei den vorgegebenen Betriebsbedingungen korrekt durchgeführt werden und so die Messergebnisse nicht verfälscht oder die Brennstoffzellenstapel unter ungünstigen Bedingungen betrieben werden.

// Monitoring of fuel cell tests with artificial intelligence

The operation of fuel cell stacks is usually monitored on test rigs using fixed alarm limits for certain operating parameters in the test bench software. As soon as levels rise above or fall below any such limit for a certain period of time, a warning is displayed or the system is switched off. Due to the wide range of operating conditions of the stacks, however, this type of monitoring only works for the extreme maximum and minimum operating conditions. Threshold limits which are too vague will prevent the detection of minor defects whereas threshold limits which are too refined will interrupt the tests more often than necessary. It is particularly important for the industrial roll-out, however, that continuous operation is stable and carried out correctly.

A new type of monitoring system for the test rigs has been developed at the ZSW using artificial intelligence. This allows adaptive, self-learning monitoring of all the relevant operating parameters. Due to the cyclical operation in endurance tests, the set operating conditions at any given load point are compared with the past operating conditions of the same load point. An example of this is shown in the diagram below. A neighbouring test rig had been put into operation therefore the cooling capacity in this example had decreased, which is why the coolant inlet temperature rose. The algorithm consequently classifies these outliers as anomalies. This ensures that the measurements are carried out correctly in the specified operating conditions and that the test results are not falsified or the fuel cell stacks operated in unfavourable conditions.



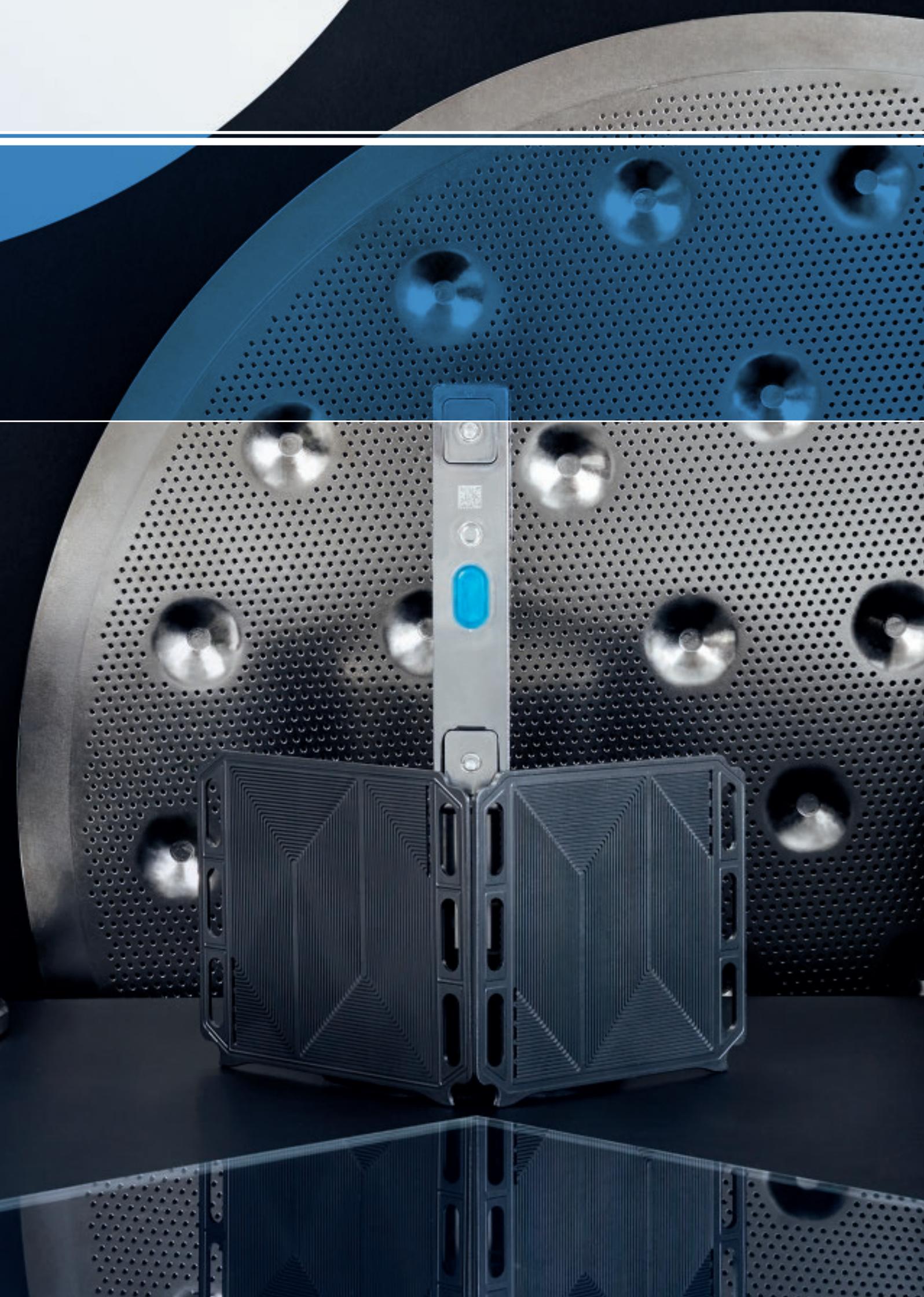
// Mit Hilfe von Mittelwert und 3-Sigma-Intervall können Abweichungen in der Kühlmiteleintrittstemperatur sicher erkannt werden.
 // The mean and three-sigma interval are reliable sources when it comes to detecting anomalies in the coolant inlet temperature.

// Dr. Alexander Kabza
 E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-832

// Öffentlichkeitsarbeit

// Public Relations





// Öffentlichkeitsarbeit

// Public Relations

Der Wissenschaft kommt eine besondere gesellschaftliche Verantwortung zu, da Forschungsergebnisse oft auch als Grundlage zur Meinungsbildung und für politische Entscheidungen dienen. Deshalb ist es wichtig, Forschungsergebnisse einer breiten Öffentlichkeit gegenüber transparent und verständlich zu kommunizieren. Dafür nutzt das ZSW verschiedene Medienformate – von der klassischen Pressemitteilung über Newsletter und Vorträge bis hin zum Poetry-Slam.

The world of scientific research has a special responsibility to society in that research findings often serve as a basis to shape public opinion and make policy decisions.

It is therefore important to communicate research results to the general public in a transparent and coherent way. The ZSW uses various media formats for this – from classic press releases, newsletters and lectures right through to poetry slams.

// WASSERSTOFF SEHEN UND VERSTEHEN

Die 4. WOCHE DES WASSERSTOFFS fand vom 25. Juni bis zum 3. Juli im Süden Deutschlands statt (#WDWS2022). Das ZSW in Ulm veranstaltete gemeinsam mit dem Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle (WBZU) einen „Tag der offenen Brennstoffzelle“. Die BesucherInnen erfuhren in hochrangig besetzten Vorträgen, unter anderem von ZSW-Vorstand Prof. Markus Hölzle, was die Donaustadt als Zentrum der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie alles zu bieten hat. Dazu gab es eine begleitende Ausstellung, Brennstoffzellenexperten zum Ansprechen sowie Wasserstoffbetankungstechnik zum Anfassen. Weitere Events mit ZSW-Beteiligung gab es in Lindau, Tuttlingen und Augsburg.

// SEEING AND UNDERSTANDING HYDROGEN

HYDROGEN WEEK was held for the fourth time from 25 June to 03 July in the south of Germany (#WDWS2022). The ZSW in Ulm joined forces with the Education and Training Centre for Innovative Energy Technologies (WBZU) to run an “Open Fuel Cell Day”. There were lectures by high-profile speakers, including ZSW board member Prof. Markus Hölzle, setting forth everything the city on the Danube has to offer as a centre of hydrogen and fuel cell technology. There was also an accompanying exhibition to visit, fuel cell experts to talk to, and hydrogen refuelling systems to touch. There were also events in Lindau, Tuttlingen and Augsburg involving the ZSW.

// INSTALLATION PLANTASIA

Das Jahr 2022 begann mit einem Event der besonderen Art. Studierende der Hochschule der Medien bauten im ZSW-Foyer eine begehbare Medieninstallation auf. Unter dem Motto „Junge Energie“ beschäftigten sich die Studierenden mit den Forschungsthemen des ZSW und interpretierten sie in einem multimedialen Erlebnisraum. Mit Medien wie Video, Ton, Grafik, Fotografie, Computeranimation und interaktiven Spielräumen sowie künstlicher Intelligenz wurde die Welt „Plantasia“ erschaffen. Besucherinnen und Besucher konnten die 15 auf 4,50 Meter große Installation betreten und die neue Welt interaktiv erfahren. Dabei wurden unter anderem Pflanzen zum Singen gebracht. Die Kooperation bot die Gelegenheit, miteinander in Dialog zu treten und neue Blickrichtungen kennenzulernen. ZSW-Mitarbeitende und Gäste machten davon regen Gebrauch. Die neue Reihe „Kunst am ZSW“ soll mit Ausstellungen und Konzerten fortgesetzt werden. Fotos der Vernissages s. S. 80.

// PLANTASIA INSTALLATION

There was a very special event at the beginning of 2022 when students from Stuttgart Media University set up a walk-in media installation in the ZSW foyer. The chosen theme was “Young Energy” and the students looked at the ZSW research subjects from this angle and interpreted them in a multimedia zone. The “Plantasia” world was brought into being with all kinds of media like video, sound, graphics, photography, computer animation, interactive spaces and artificial intelligence. Visitors were invited to enter the 15 by 4.50 metre installation and experience the new world interactively. Singing plants were among the fascinating elements on show. The event was an opportunity to collaborate and converse and to consider issues from new perspectives. ZSW staff and visitors from outside seized the chance and made good use of it. The new series “Art at the ZSW” is set to continue with exhibitions and concerts. Photos vernissage see p. 80.





// Eine Gruppe von über 30 Medienvertretern folgte den beiden Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann und Markus Söder ins ZSW, um sich bei ZSW-Vorstand Markus Hölzle über Wasserstoff zu informieren.

// A retinue of more than 30 media representatives followed the two Minister-Presidents Winfried Kretschmann and Markus Söder into the ZSW to find out more about hydrogen from board member Markus Hölzle.

// WASSERSTOFFALLIANZ FÜR DEN SÜDEN

Am 29. August besuchten die Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann und Dr. Markus Söder im Vorfeld ihrer gemeinsamen Pressekonferenz zum Thema Wasserstoff im bayerischen Neu-Ulm das ZSW im Ulmer Science Park. Dort entsteht gerade eine einzigartige Brennstoffzellen-Modellfabrik (HyFaB), in der Fachleute die notwendigen Voraussetzungen und Prozesse für die Großserienproduktion von Brennstoffzellen entwickeln werden. Bis zum Jahr 2030 sollen mehr als 80 Millionen Euro in dieses Projekt fließen, das den beginnenden Produktions- und Markthochlauf dieser emissionsfreien, wasserstoffbasierten Antriebstechnologie beschleunigen soll.

// LANDWIRTSCHAFTLICHES HAUPTFEST STUTTGART

Das Landwirtschaftliche Hauptfest ist seit 1889 eine feste Institution in Stuttgart, auf der sich mehr als 500 Aussteller zu Verbrauchertemen präsentieren. Auf dem diesjährigen Event stellte ZSW-Mitarbeiter Dr. Jochen Brellochs das mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung geförderte Projekt „P-XTRACT – Staufener Bucht“ vor. Mit der am ZSW entwickelten Technologie wird es möglich, wertvollen Phosphor als Pflanzendünger aus Klärschlamm zu gewinnen. Foto s.S.76.

// BESUCH VOM PHOSPHORKONGRESS

Vom Kongress ins Labor: 70 Besucher und Besucherinnen des Phosphorkongresses in Stuttgart nahmen im November an einer Führung durch das ZSW-Labor teil. Der Schwerpunkt der Exkursion lag auf Phosphorrecycling und Elektrolyse.

// HYDROGEN ALLIANCE FOR THE SOUTH

Minister-Presidents Winfried Kretschmann and Dr. Markus Söder were in town on 29 August ahead of their joint press conference in the Bavarian city of Neu-Ulm on the subject of hydrogen and visited the ZSW in Ulm Science Park where a unique model factory is currently being developed for fuel cells (HyFaB). It will facilitate expert research into the conditions and processes required for the large-scale production of fuel cells. An amount of more than 80 million euro is earmarked in funding until 2030 for this project which is intended to escalate production and accelerate the routes to market for this emission-free, hydrogen-based drive technology.

// AGRICULTURAL SHOW IN STUTTGART

The Landwirtschaftliches Hauptfest agricultural show has been a permanent institution in Stuttgart since 1889. The consumer fair attracted more than 500 exhibitors in the autumn. ZSW employee Dr. Jochen Brellochs attended the event this year and presented the ERDF-funded project “P-XTRACT – Staufener Bucht”. The technology developed at the ZSW will make it possible to extract valuable phosphorus from sewage sludge for use as a plant fertiliser. Photos p.76.

// VISIT FROM PHOSPHORUS CONFERENCE

From conference to laboratory: 70 delegates from the Phosphorus Conference in Stuttgart were taken on a tour of the ZSW laboratory in November. The focus of the excursion was on phosphorus recycling and electrolysis.



// Vorstand Michael Powalla zeigt Ricarda Lang das Labor.
 //Board member Michael Powalla showing Ricarda Lang the laboratory.

// RICARDA LANG ZU BESUCH IN STUTTGART

Die Bundesvorsitzende von Bündnis 90/Die Grünen, Ricarda Lang, besuchte das ZSW im Dezember. Bei einer Führung durch die Laborräume mit den ZSW-Vorständen zeigte sie großes Interesse an den ZSW-Themen.

// RICARDA LANG DROPS BY FOR A VISIT

The federal chair of the Alliance 90/The Greens Ricarda Lang visited the ZSW in December. She went on a tour of the laboratory with the ZSW board members and showed great interest in the research carried out at the ZSW.

// ENERGIEWENDE-UPDATE FÜR KUNDENBERATERINNEN DER BW-BANK

Auf Anfrage der LBBW begrüßte das ZSW Stuttgart am 22. Juli eine Gruppe von rund 30 KundenberaterInnen der BW-Bank. Sie erhielten ein Energiewende-Update: ExpertInnen des ZSW informierten sie über Wege aus der Energiekrise, Windenergieforschung am ZSW sowie Nachhaltigkeit durch dezentrale Photovoltaik, Sektorkopplung, ressourcenschonende Prozesse und KI. Ein Besuch im PV-Dünnschichtlabor, im Modultestlabor Solab sowie an der Solarfassade rundete die Veranstaltung ab.

// ENERGY TRANSITION UPDATE FOR BW-BANK CUSTOMER ADVISERS

At the request of the LBBW regional bank, the ZSW Stuttgart welcomed a group of around 30 customer advisers from the BW-Bank on 22 July. They were given an update on the energy transition, with ZSW experts imparting information on ways out of the energy crisis, wind energy research at the ZSW, and on sustainability through decentralised photovoltaics, sector coupling, resource-efficient processes and AI. A visit to the PV thin-film laboratory, the Solab module test laboratory and the solar façade rounded off the event.

// HANNOVER MESSE

Das ZSW setzte bei der Hannover Messe vom 30. Mai bis 2. Juni den Schwerpunkt auf die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen. Vor Ort zeigte das ZSW hochmoderne Technik zur Abnahme von Wasserstofftankstellen sowie Exponate aus der Batterie- und Brennstoffzellenforschung. Das Interesse war sehr groß; zu den StandbesucherInnen zählten u. a. die baden-württembergische Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut und die finnische Botschafterin Anne Sipiläinen.

// HANNOVER MESSE

The ZSW was at the Hannover Messe trade fair from 30 May to 02 June where it was focusing on the subjects of hydrogen and fuel cells. Alongside demonstrations of state-of-the-art technology for the inspection and approval of hydrogen filling stations, the ZSW also brought exhibits from battery and fuel cell research to the show. Great interest was shown by the visitors to the booth who included Baden-Württemberg Minister of Economic Affairs Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut and Finnish Ambassador Anne Sipiläinen.

// v.l.n.r.: e-mobil BW-Geschäftsführer Franz Loogen, Wirtschaftsministerin Nicole Hoffmeister-Kraut, ZSW-Vorstand Markus Hölzle sowie die Botschafterin Finnlands Anne Sipiläinen am ZSW-Stand auf der Hannover Messe.

// Left to right: e-mobil BW Managing Director Franz Loogen, Minister of Economic Affairs Nicole Hoffmeister-Kraut, ZSW board member Markus Hölzle, and Finnish Ambassador Anne Sipiläinen at the ZSW booth at the Hannover Messe.





// AUF DER F-CELL

Auf der f-cell 2022 vom 4. bis 5. Oktober in Halle 2 des Stuttgarter Messegeländes präsentierte das ZSW klimafreundliche Technologien für den Markthochlauf von Wasserstoff und Brennstoffzellen (s. Abb. oben).

// AT THE F-CELL FAIR

The ZSW was in Hall 2 at f-cell 2022 from 04 to 05 October at the Stuttgart exhibition site where it was presenting eco-friendly technologies for the market ramp-up of hydrogen and fuel cells (see photo above).

// 8TH WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION

Endlich wieder live: die EU PVSEC, die europäische Photovoltaik-Tagung, fand in diesem Jahr zusammen mit der 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-8) vom 26. bis 30. September in Mailand statt. Zwischen Vortragssälen auf der einen und Pausenbuffet auf der anderen Seite war der Stand des ZSW zu finden. Das Institut war darüber hinaus mit Vorträgen und Präsentationen gut repräsentiert.

// 8TH WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION

Finally back with a live audience: EU PVSEC, the European conference in photovoltaic research, took place this year with the 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-8) from 26 to 30 September in Milan. The ZSW booth was located between the lecture rooms on one side and the refreshment bar on the other. The institute also showed its strength in lectures and presentations.

// INTERSOLAR EUROPE

Das ZSW präsentierte seine Dienstleistungen in den Bereichen Photovoltaik-Materialforschung und Modulqualität sowie erstmals auch die Batterieforschung und -tests auf dem Gemeinschaftsstand Baden-Württemberg bei der Intersolar Europe vom 11. bis 13. Mai in München. Das Interesse am wissenschaftlichen Know-how des ZSW war groß und die Aufbruchstimmung in der Photovoltaikbranche deutlich zu spüren.

// INTERSOLAR EUROPE

The ZSW promoted its services in photovoltaic materials research and module quality and also introduced battery research and battery tests for the first time at the shared Baden-Württemberg booth at the Intersolar Europe trade fair from 11 to 13 May in Munich. There was great interest in the scientific know-how of the ZSW and a tangible sense of enthusiasm for a new era in the photovoltaics industry.

// Besuch vom Umweltministerium am baden-württembergischen Gemeinschaftsstand auf der Intersolar Europe in München.

// Visit from the Ministry of the Environment at the shared Baden-Württemberg booth at the Intersolar Europe trade fair in Munich.





// EIN TAG ALS ENERGIEFORSCHERIN: DEM SOLARSTROM AUF DER SPUR

Zum Girls' Day am 28. April bot das ZSW in Stuttgart zehn Schülerinnen erste Einblicke in die Energieforschung und die Entwicklung von Solarzellen. Nach Berichten von ZSW-Kolleginnen aus ihrem Arbeitsalltag an einem Forschungsinstitut hatten die Mädchen im Dünnschichtlabor Gelegenheit, eine Solarzelle unter dem Sonnensimulator zu messen. Anschließend erfuhr sie im Modultestlabor Solab, wie man Photovoltaikmodule mit mechanischer Belastung oder im Klimaschrank mit hoher Luftfeuchtigkeit und Wärme einem Stresstest aussetzt.

// PV-SYMPOSIUM IN FREIBURG

Noch geprägt von der Corona-Pandemie fand das traditionsreiche 37. PV-Symposium in diesem Jahr vom 21. bis 23. Juni auf der Messe Freiburg als Hybridveranstaltung statt. Das ZSW, wie stets im Wissenschaftlichen Beirat und unter den ReferentInnen und ExpertInnen gut vertreten, fand besonderen Anklang mit Maximilian Engels Vortrag zu dem aktuellen Thema „PV auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft: Reparatur und Wiederverwendung von PV-Modulen“.

// ENERGIEPOLITISCHES FORUM

Nach zwei Jahren pandemiebedingter Pause fand im Juli wieder das Energiepolitische Forum in Präsenz in Stuttgart statt. Organisiert von ZSW und „KEA-BW – die Landesenergieagentur“ ging es um das Thema „Klimaneutralität bis 2040 – wie schaffen wir das?“.

// A DAY IN THE LIFE OF AN ENERGY RESEARCH SCIENTIST IN PURSUIT OF DISCOVERIES IN SOLAR POWER

The ZSW in Stuttgart marked Girls' Day on 28 April by offering 10 schoolgirls the chance to gain initial experience in energy research and in the development of solar cells. After listening to female ZSW staff talking about their day-to-day work at a research institute, the girls were taken to the thin-film laboratory where they had the opportunity to measure a solar cell under the solar simulator. The next stop was the Solab module test laboratory where they learned how to conduct mechanical stress tests on photovoltaic modules or subject them to high levels of humidity and heat in the climatic exposure test cabinet.

// PV SYMPOSIUM IN FREIBURG

Still overshadowed by the coronavirus pandemic, the traditional PV Symposium, now in its 37th year, took the form of a hybrid event this year at the Messe Freiburg fairground from 21 to 23 June. The ZSW, as always well represented on the scientific advisory board and among the speakers and experts, hit exactly the right note with Maximilian Engel's lecture on the burning issue of "PV and the circular economy: repair and reuse of PV modules".

// ENERGY POLICY FORUM

The Energiepolitisches Forum energy policy forum was back in Stuttgart again in July after a two-year break due to the pandemic. Organised by the ZSW and the Baden-Württemberg climate control and energy agency "KEA-BW", the subject was "Climate neutrality by 2040 – how can we achieve it?"





// Über 200 Teilnehmende auf der internationalen Konferenz zu Natrium-Ionen-Batterien ICNaB, die das HIU und das ZSW ausrichteten.
 // There were over 200 delegates at the International Conference on Sodium Batteries (ICNaB) which was jointly hosted by the HIU and ZSW.

// SCIENCE-SLAM

Wer meint, dass Wissenschaft immer bieder daherkommen muss, der irrt. Denn seriöse Forschung schließt eine Portion Humor keineswegs aus, wie ZSW-Mitarbeiter Dr. Frank Musiol in seinem Poetry-Slam eindrucksvoll zeigte. Der Aufforderung „Ran ans Mic“ beim Science-Slam-Wettbewerb des „Deutschen Naturschutztags“ im Sommer in Hannover kam er gerne nach, um auf der Bühne die Naturschutzforschung im Rahmen des ZSW-Windtestfelds auf humorvolle Weise zu präsentieren. Er belegte damit den zweiten Platz im Wettbewerb.

// SCIENCE SLAM

Anyone who thinks that science always has to come across as stuffy is wrong, because serious research certainly does not preclude a dose of humour, as ZSW employee Dr. Frank Musiol impressively showed in his poetry slam contribution. He gladly rose to the challenge to take to the stage at the open mic session at the Science Slam competition at the “German Nature Conservation Day” in Hanover in the summer and promptly delivered a humorous take on nature conservation research at the ZSW wind test site. He came second in the competition.

// INTERNATIONALE KONFERENZ ZU NATRIUMBATTERIEN ICNAB

Die ICNaB-Konferenzen (International Conference on Natrium-ion Batteries) wurden ins Leben gerufen, um das grundlegende Verständnis von Batteriematerialien zu verbessern, die Diskussion und Kommunikation von Forschungs- und Entwicklungsfortschritten zu beschleunigen und die weltweite Zusammenarbeit auf dem Gebiet von Natrium-Ionen-Batterien zu stärken. Die 7. Ausgabe organisierten ZSW und Helmholtz-Institut Ulm (HIU) gemeinsam vom 5. bis 8. Dezember im Ulmer Stadthaus. Die Relevanz der Thematik spiegelte sich in über 200 Teilnehmenden aus Hochschulen und Batterieunternehmen weltweit wider. Der Natrium-Ionen-Akku soll 2023 marktfähig sein und kommt ohne Lithium, Nickel und Kobalt aus.

// INTERNATIONAL CONFERENCE ON SODIUM BATTERIES (ICNAB)

The ICNaB conferences (International Conference on Sodium Batteries) were launched to improve the basic understanding of battery materials, to facilitate communication and discussion of advances in research and development, and to strengthen global cooperation in the field of sodium-ion batteries. Organised jointly by the ZSW and the Helmholtz Institute Ulm (HIU), the 7th conference was held in the Stadthaus civic hall in Ulm from 05 to 08 December. The relevance of the subject was reflected in the attendance of over 200 delegates from universities and battery companies all over the world. Sodium-ion batteries are expected to hit the market in 2023 and are made without lithium, nickel or cobalt.

// WISSENSCHAFTSFESTIVAL STUTTGART

Beim „Wissenschaftsfestival Stuttgart“ öffnete das ZSW im Sommer an zwei Tagen seine Pforten für die interessierte Öffentlichkeit. Mit Vorträgen und Laborführungen wurden die Gäste über die Themen Energiewende, Wasserstoff und Solarstrom informiert, um die Kommunikation zwischen Wissenschaft und Bürgern zu fördern.

// SCIENCE FESTIVAL IN STUTTGART

The ZSW opened its doors to the public on two days in the summer at the “Stuttgart Science Festival”. There were lectures and laboratory tours to satisfy the interest of the visitors who were given information on the energy transition, hydrogen and solar power with a view to facilitating communication between research scientists and citizens.



// Eine Schülerin misst am Girls'Day eine Solarzelle am Sonnensimulator.
 // A schoolgirl measuring a solar cell on the solar simulator on Girls'Day.



// DAS ZSW IM KINO

„Die Speicherkarten sind vollgepackt mit beeindruckenden Bildern“, so das Statement des Regisseurs nach den Filmaufnahmen der Montagehalle in Königsbronn. Hier wurden die Windenergieanlagen für das ZSW-Windtestfeld montiert – eine Kulisse wie geschaffen für Filmaufnahmen. Aus diesem Grund wird das Testfeld auch in dem Film „In einem idealen Land“ zu sehen sein. Auftraggeber für dieses Filmprojekt zur Energiewende ist das Umweltministerium Baden-Württemberg. Gezeigt wird der Film im Frühjahr 2023 in 139 Orten und auf 499 Leinwänden.

// VORTRAG „CRADLE TO CRADLE“

Er polarisiert und provoziert – und das im Dienste der Umwelt. Mit dem bekannten Chemiker und Verfahrenstechniker Prof. Michael Braungart hatte das ZSW im September eine streitbare Persönlichkeit zu einem Vortrag mit Diskussion unter dem Motto „Circular Economy: Von der Vision zur Wirklichkeit“ ans ZSW eingeladen – eine Veranstaltung, die sich als fruchtbar für beide Seiten erwies. Michael Braungart ist Mitbegründer des Prinzips „Cradle to Cradle“, für das er in Fernsehauftritten und Vorträgen wirbt.

// ZSW-MAGAZIN

Seit Sommer gibt es das digitale „ZSW-Magazin“, das als Newsletter verschickt wird und regelmäßig die neuen ZSW-Themen interessant und verständlich darstellt. So wird unter anderem in der Rubrik „Ein Tag mit ...“ der Arbeitsalltag von ZSW-Mitarbeitenden geschildert. In der ersten Ausgabe ging es um das Thema Elektrolyse und den Schulterschluss zwischen Forschung und Industrie. Das zweite „ZSW-Magazin“ beleuchtete das Thema Circular Economy und die Forschungstätigkeit dazu in Stuttgart und Ulm. Das „ZSW-Magazin“ kann über das Kontaktformular auf der Website abonniert werden.

// ZSW AT THE CINEMA

“The memory cards are packed with fantastic footage,” said the director after filming in the assembly shop in Königsbronn. This is where the wind turbines for the ZSW wind test site were assembled – a backdrop which seems made for film shoots. This is why the test site will also be seen in the film “In einem idealen Land” (“In an ideal country”). The Baden-Württemberg Ministry of the Environment commissioned this film on the energy transition. The film will be shown in the spring of 2023 in 139 venues and on 499 screens.

// “CRADLE TO CRADLE” LECTURE

He divides opinion and provokes response – and does so in the interests of the environment. The ZSW chose a controversial character in September when it invited the high-profile chemist and process engineer Prof. Michael Braungart to a lecture and discussion at the ZSW entitled “Circular economy: from vision to reality”. It was an event which turned out to be fruitful for both parties. Michael Braungart is co-founder of the “Cradle to Cradle” principle which he promotes in television appearances and lectures.

// ZSW MAGAZINE

Available since the summer, the digital “ZSW Magazine” is sent out as a regular bulletin with interesting and clearly understandable accounts of the news at the ZSW. One feature, for example, is the column “A day in the life of...” which allows a glimpse into the working life of selected ZSW employees. The first issue covered the subject of electrolysis and the close alliance between research and industry. The second “ZSW Magazine” shone a light on the circular economy and the research work on the subject in Stuttgart and Ulm. A subscription to the “ZSW Magazine” can be taken out using the contact form on the website.



// Das neue ZSW-Magazin.
// The new ZSW Magazine.



// Um Wasserstoff und Wertschöpfung ging es in dem Vortrag von Marc-Simon Löffler und Andreas Püttner (ZSW).

// The presentation held by Marc-Simon Löffler and Andreas Püttner (ZSW) was about hydrogen and added value.

// VORTRAGSREIHE „WASSERSTOFF“

Die Württembergische Landesbibliothek kooperiert mit dem ZSW für die Vortragsreihe „Wasserstoff“, die den Austausch zwischen Forschung, Industrie, Politik und Gesellschaft anregen soll. Das ZSW half mit seiner Expertise bei der Aufstellung des Programms und gab mit zwei Vorträgen Einblick in die Forschungsarbeit des Instituts. ZSW-Vorstand Prof. Frithjof Staiß hielt im September den Eröffnungsvortrag zum Thema „Wasserstoff als Schlüssel für das Erreichen der Klimaneutralität“. Marc-Simon Löffler und Andreas Püttner gingen auf die Technologie zur Wasserstoffherzeugung ein.

// “HYDROGEN” LECTURE SERIES

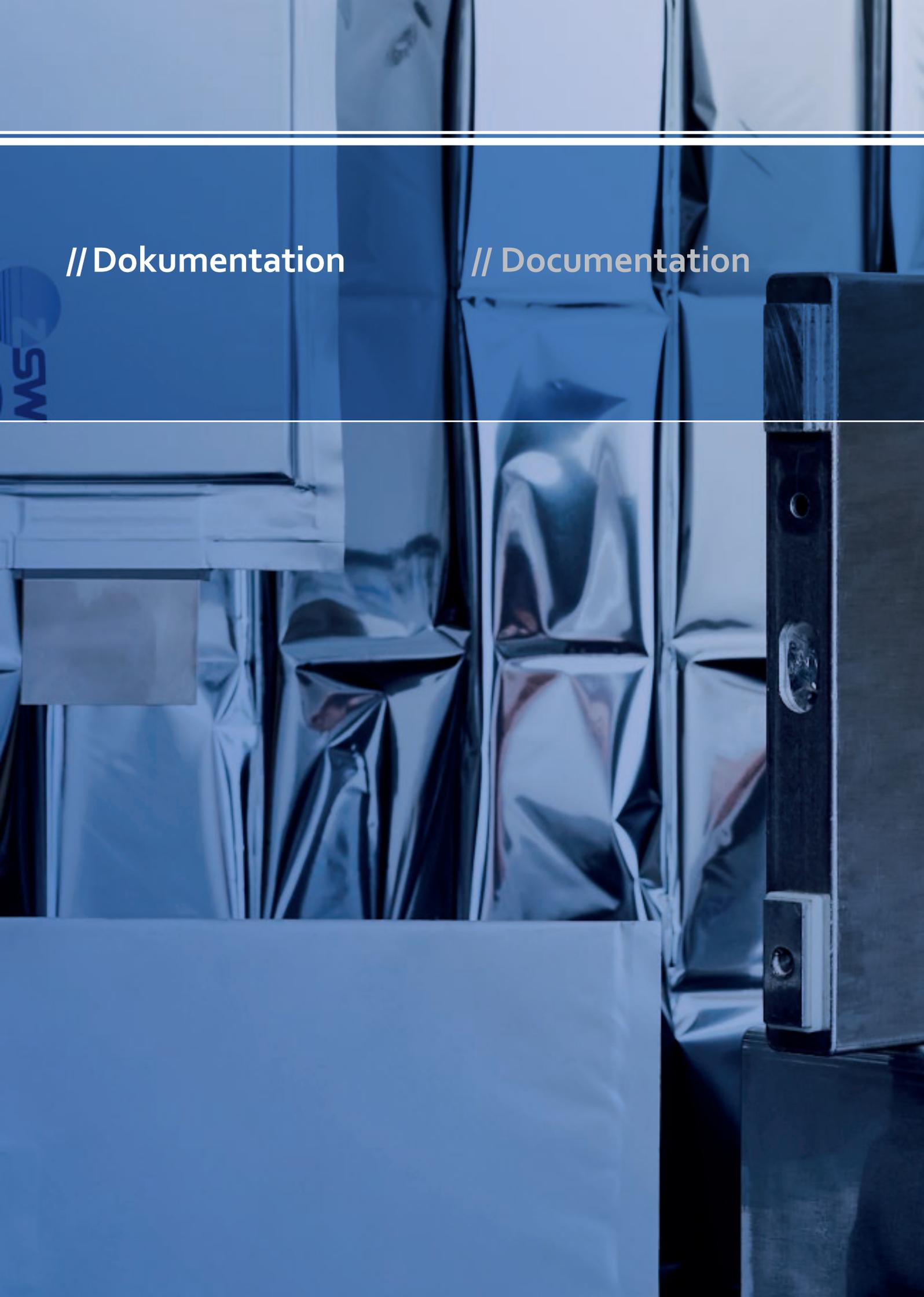
The Württemberg State Library is cooperating with the ZSW to run the series of lectures on “Hydrogen” which is intended to stimulate communication between research, industry, politics and society. Drawing on its expertise, the ZSW helped to devise the programme and gave two lectures providing insight into the research work of the institute. ZSW CEO Prof. Frithjof Staiß held the opening lecture in September on the subject of “Hydrogen as the key to achieving climate neutrality”. Marc-Simon Löffler and Andreas Püttner added further details on hydrogen production technology.

// TERMINE 2023

Einweihung Windtestfeld Hannover Messe, Stand in Halle 13 und bei e-mobil BW	Frühjahr 2023 17.–21. April 2023
Intersolar in München mit Photovoltaik und Elektrochemische Energietechnologien (Akkumulatoren)	13.–14. Juni 2023
Ulm Electro Chemical Talks (UECT) im Maritim Ulm	14.–15. Juni 2023
Hydrogen & Fuel Cell Conference and Trade Fair (hy-fcell) Stuttgart	13.–14. Sept. 2023
40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) Lissabon	18.–22. Sept. 2023
9th International Conference on Fundamen- tals & Development of Fuel Cells (FDFC2023)	25.–27. Sept. 2023
International Battery Safety Week (IBSW)	28.–29. Sept. 2023
Einweihung HyFaB mit Bundesverkehrs- minister Dr. Volker Wissing	Oktober 2023

// DIARY DATES 2023

Inauguration of wind test site Hannover Messe, booth in Hall 13 and at e-mobil BW	Spring 2023 17-21 April 2023
Intersolar trade fair in Munich on photovoltaics and electrochemical energy technologies (accumulators)	13-14 June 2023
Ulm Electro Chemical Talks (UECT) at the Maritim Hotel in Ulm	14-15 June 2023
Hydrogen & Fuel Cell Conference and Trade Fair (hy-fcell) Stuttgart	13-14 Sept. 2023
40th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) Lisbon	18-22 Sept. 2023
9th International Conference on Fundamen- tals & Development of Fuel Cells (FDFC2023)	25-27 Sept. 2023
International Battery Safety Week (IBSW)	28-29 Sept. 2023
Inauguration of HyFaB with Federal Transport Minister Dr. Volker Wissing	October 2023



// Dokumentation

// Documentation





// Finanzbericht

Financial Information

// EINNAHMEN – AUSGABEN

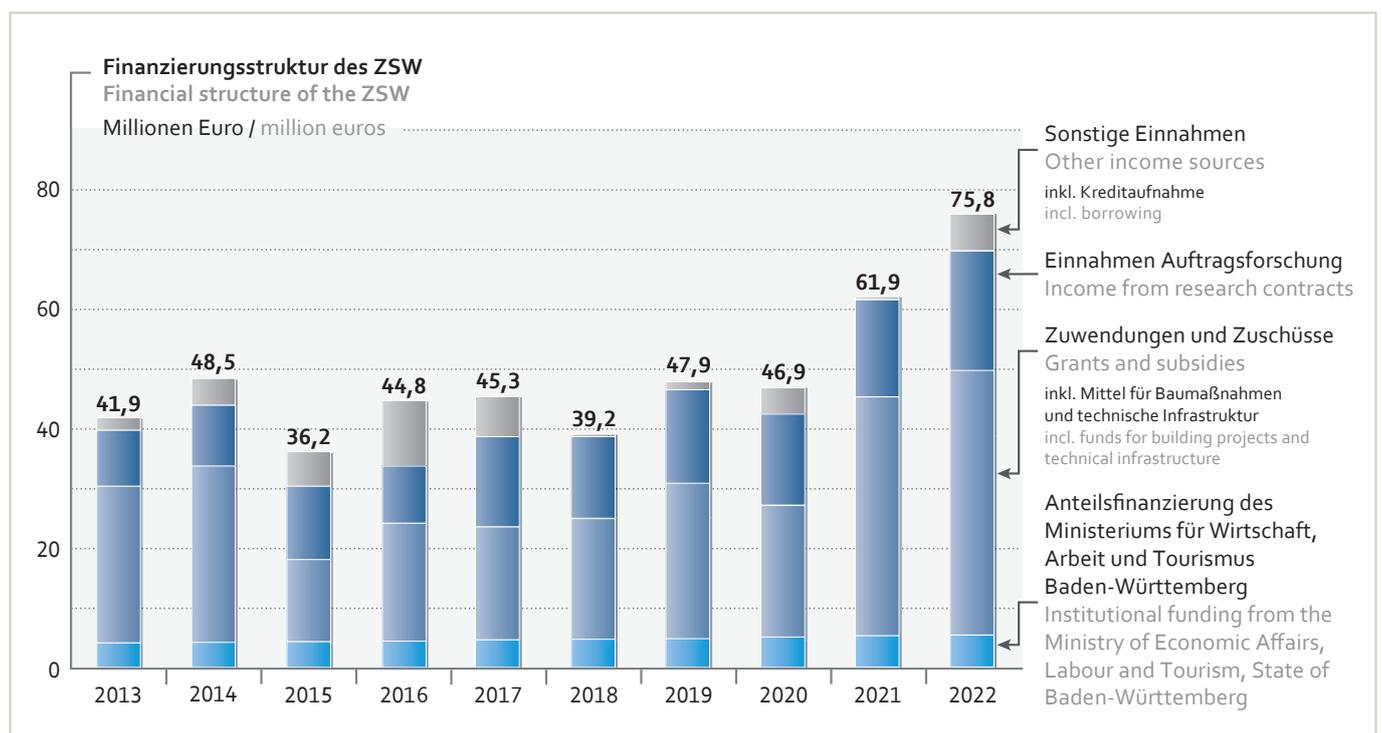
Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 75,8 Mio. Euro und damit über dem Niveau von 2021, weil im Berichtsjahr überdurchschnittlich hohe Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen im Themenfeld Brennstoffzellen zugegangen sind.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2022 um 0,2 Mio. auf 5,5 Mio. Euro.

// REVENUE – EXPENDITURE

The revenue from ordinary business activities in the past year amounted to 75.8 million euro, higher than in 2021 due to above-average investment funding for the fuel cell departments in the year under review.

The proportion of institutional funding from the state of Baden-Württemberg increased by 0.2 million euro to 5.5 million euro in 2022.



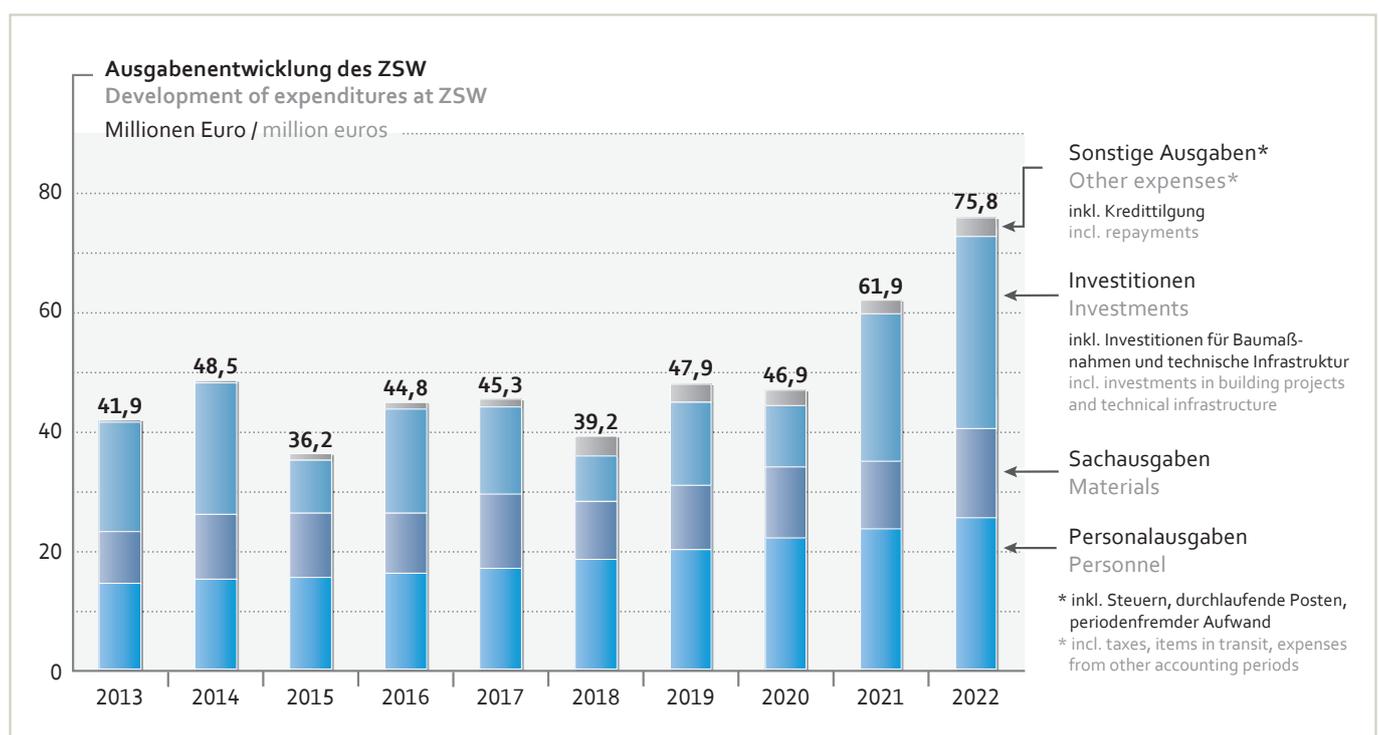


Das Ausgabevolumen erhöhte sich im Berichtsjahr korrespondierend zu den höheren Investitionen auf 75,8 Mio. Euro.

The expenditure volume increased to 75.8 million euro in the reporting year, corresponding to the higher investments.

Die Personalausgaben stiegen aufgrund einer Tarifierhöhung und eines Anstiegs der Personalkapazität auf 25,6 Mio. Euro.

Expenditure on human resources went up to 25.6 million euro due to a wage increase and additional staffing.



// Personalentwicklung

People Development

// PERSONALENTWICKLUNG

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 2022 gegenüber dem Vorjahr von 286 Vollzeitstellen auf 290 erhöht. Das entspricht einer Beschäftigtenzahl von 317. 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 12 % aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft. Die Kolleginnen und Kollegen kommen aus 20 verschiedenen Ländern.

Der Frauenanteil lag bei 22 %. Das ZSW strebt an, diesen für technisch orientierte Forschungsinstitute typischen Anteil zu erhöhen, indem es möglichst flexibel ausgestaltete Arbeitszeitmodelle anbietet, die die unterschiedlichen Lebenssituationen und Interessen von Frauen und Männern berücksichtigen und eine Vereinbarkeit von Beruf und Familie erleichtern.

Kompetente und motivierte Kolleginnen und Kollegen sind unser Erfolgsfaktor. Das ZSW stellt deshalb ein breites Spektrum an Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen zur Verfügung. Es umfasst fachspezifische und fachübergreifende Inhalte ebenso wie Angebote zur Persönlichkeitsentwicklung und Schulungen für Führungskräfte. Das Interesse daran ist groß. Insgesamt fanden im Berichtsjahr über 20 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt rund 100 Beschäftigte teilnahmen. Darüber hinaus standen im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements am ZSW unter anderem Angebote zu den Themen Bewegung, Stressprävention und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm; aufgrund der Corona-Pandemie musste das Angebot allerdings zunächst etwas eingeschränkt werden.

// PEOPLE DEVELOPMENT

The ZSW is an attractive employer, boasting relevance for the future, good working conditions, friendly relations among colleagues, and many prospects for professional development for its employees.

In terms of staffing, the full-time equivalent increased in 2022, rising to 290 from 286 in the previous year. The number of people employed is 317. 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 12% of the employees have foreign citizenship, for example, with colleagues coming from 20 different countries.

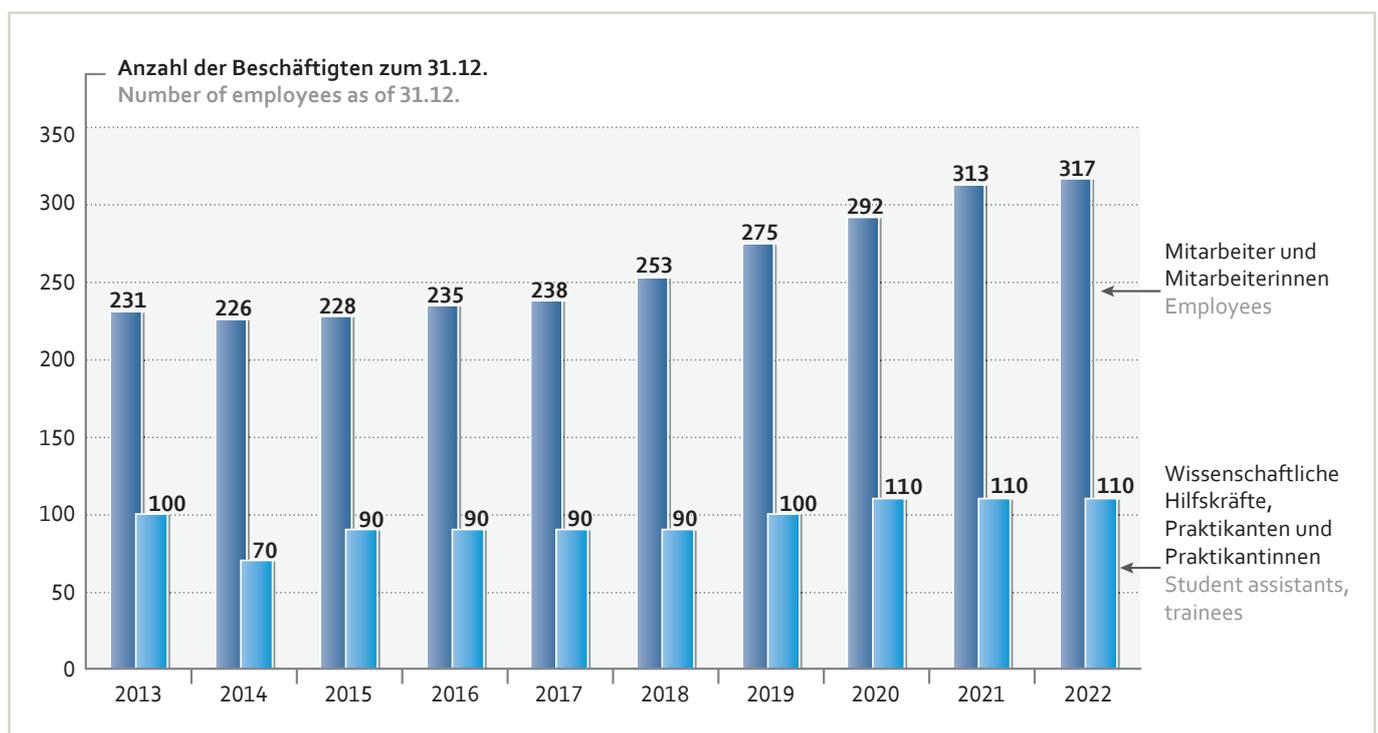
The proportion of women was 22%. The ZSW is keen to increase this percentage, which is typical for research institutes with a focus on technical subjects, by offering flexible working time models which take due account of the different situations and interests of women and men and make it easier to combine career and family.

Knowledgeable and dedicated staff are key to our success. The ZSW therefore provides access to a wide range of in-service training courses and professional development opportunities. The contents vary, covering subject knowledge, broader research-related issues, personal development, and training for managers. There is great interest in the courses. There were 20 such events altogether in the year under review, with a total of around 100 employees attending. There is also an occupational health management scheme in place at the ZSW, offering help with various issues including exercise, stress prevention and ergonomics in the workplace, but there were some restrictions to the programme at first due to the coronavirus pandemic.



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 2022 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 110 Studierende sowie Praktikantinnen und Praktikanten am ZSW tätig. Im Berichtsjahr fertigten 38 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertation an.

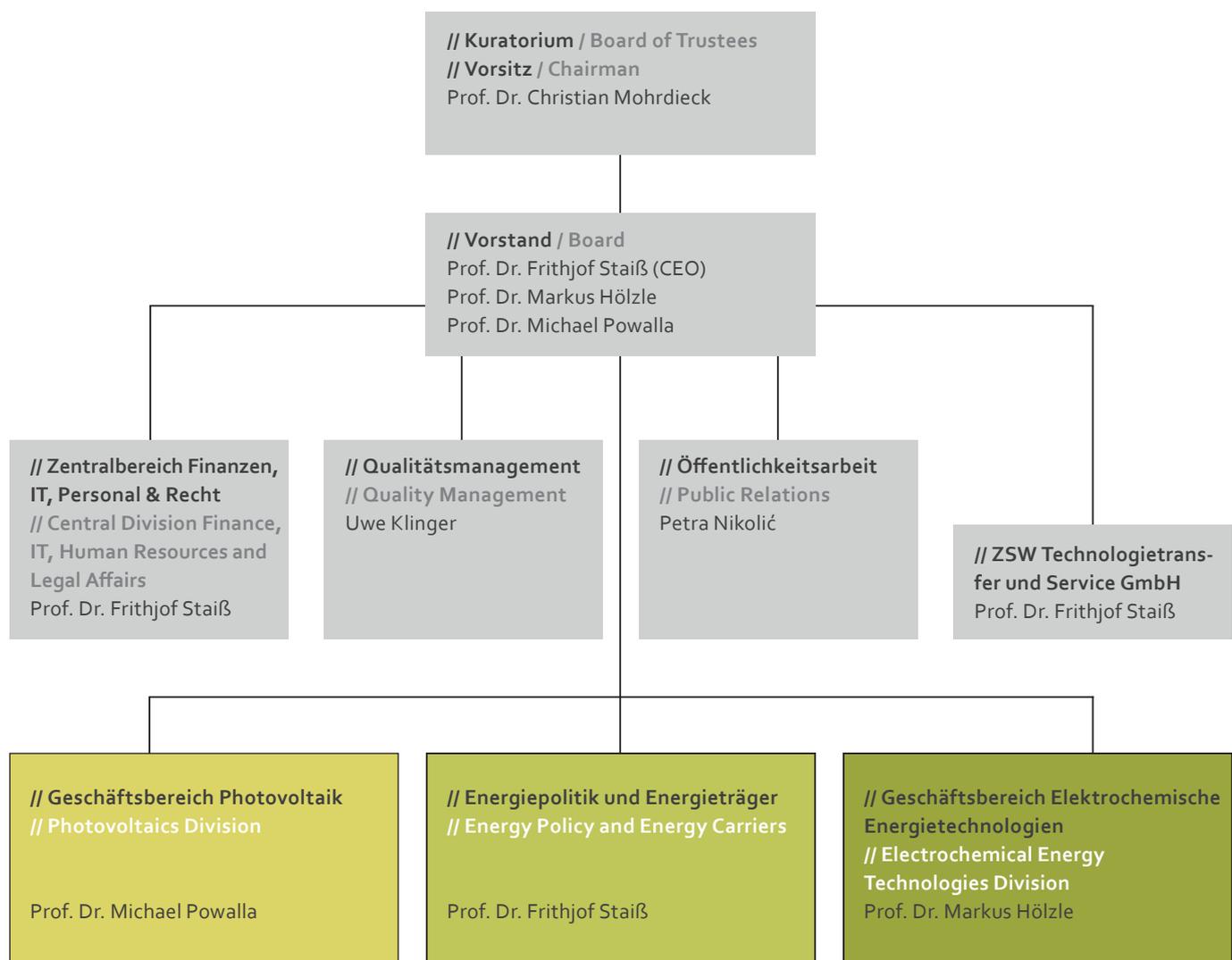
Great importance is attached to networking so the ZSW has links with universities and assists with academic training in the form of lectures, seminars, internships and supervision of research papers and final dissertations. There were therefore 110 students and interns working at the ZSW in 2022 in addition to the staff employed under the salary scheme for state employees (Tarifvertrag der Länder - TV-L). In the year under review, 38 postgraduate students completed their doctorates.



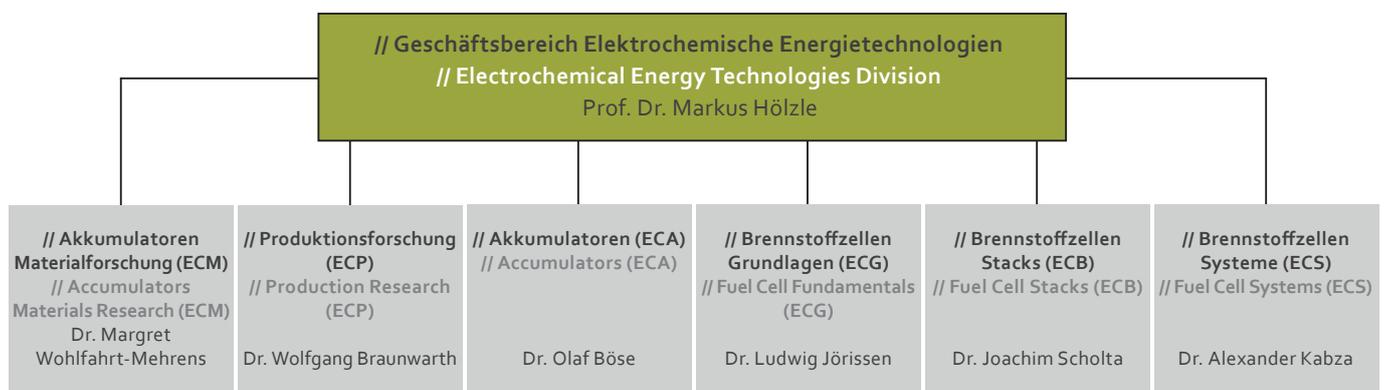
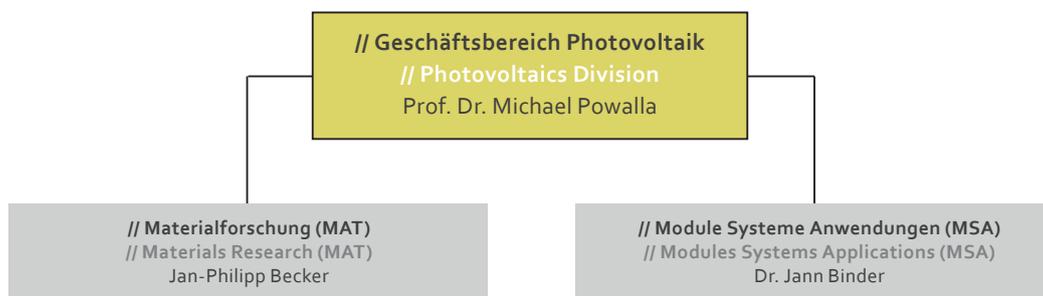
// Organisationsstruktur

Organisational Structure

// ORGANIGRAMM DES INSTITUTS
ZSW ORGANISATIONAL CHART



// ORGANIGRAMME DER GESCHÄFTSBEREICHE
 // DEPARTMENTAL STRUCTURE



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

// VERÖFFENTLICHUNGEN IN BÜCHERN UND ZEITSCHRIFTEN PUBLICATIONS IN BOOKS AND JOURNALS

- / Biber B. (Hosokawa Alpine), Sander S. (Hosokawa Alpine), Martin J., Wohlfahrt-Mehrens M., Mancini M.; **Improved production process with new spheroidization machine with high efficiency and low energy consumption for rounding natural graphite for Li-ion battery applications**; Carbon, Vol. 201, 5 January 2023, Pages 847-855; <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.09.073>
- / Bozorgchenani M., Kucinskis G., Wohlfahrt-Mehrens M., Waldmann T.; **Experimental confirmation of C-rate dependent minima shifts in Arrhenius plots of Li-ion battery aging**; Journal of the Electrochemical Society, 169 (2022) 030509; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac580d>
- / Byranvand M. (Univ. Stuttgart), Kodalle T. (LBNL), Zuo W. (Univ. Stuttgart), Magorian Friedlmeier T., Abdelsamie M. (LBNL), Hong K. (LBNL), Zia W. (Univ. Stuttgart), Perween S. (Univ. Stuttgart), Clemens O. (Univ. Stuttgart), Sutter-Fella C. (LBNL), Saliba M. (Univ. Stuttgart); **One-step thermal gradient- and antisolvent-free crystallization of all-inorganic perovskites for highly efficient and thermally stable solar cells**; Advanced Science, Vol. 9, Issue 23, Aug. 2022, 2202441; <https://doi.org/10.1002/advs.202202441>
- / Czudek A. (WUT), Urbaniak A. (WUT), Eslam A., Wuerz R., Igalson M. (WUT); **Potassium vs sodium in Cu(In,Ga)Se₂ - Similarities and differences in the electrical characteristics of solar cells and thin films after NaF or KF post-deposition treatment**; Physica Status Solidi Rapid Research Letters, Vol. 16, Issue 1, January 2022, 2100459; <https://doi.org/10.1002/pssr.202100459>
- / Feeney T. (KIT), Hossain I. (KIT), Gharibzadeh S. (KIT), Gota F. (KIT), Singh R. (KIT), Fassi P. (KIT), Mertens A. (KIT), Farag A. (KIT), Becker J.-P., Paetel S., Ahlswede E., Paetzold U. (KIT); **Four-terminal perovskite/copper indium gallium selenide tandem solar cells; Unveiling the path to >27% in power conversion efficiency**; Solar RRL, Vol. 6, Issue 12, Dec. 2022, 2200662; <https://doi.org/10.1002/solr.202200662>
- / Flügel M., Richter K., Wohlfahrt-Mehrens M., Waldmann T.; **Detection of Li deposition on Si/Graphite anodes from commercial Li-ion cells - A post-mortem GD-OES depth profiling study**; Journal of the Electrochemical Society, 169 (2022) 050519; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac70af>
- / Fonoll-Rubio R. (IREC), Paetel S., Grau-Luque E. (IREC), Becerril-Romero I. (IREC), Mayer R. (IREC), Pérez-Rodríguez A. (IREC), Guc M. (IREC), Izquierdo-Roca V. (IREC); **Insights into the effects of RbF-post-deposition treatments on the absorber surface of high efficiency Cu(In,Ga)Se₂ solar cells and development of analytical and machine learning process monitoring methodologies based on combinatorial analysis**; Advanced Energy Materials Vol. 12, Issue 8, Feb. 2022, 2103163; <https://doi.org/10.1002/aenm.202103163>
- / Gauckler C., Dillenz M. (Univ. Ulm), Maroni F., Pfeiffer L., Biskupek J. (Univ. Ulm), Sotoudeh M. (Univ. Ulm), Fu Q. (Univ. Ulm), Kaiser U. (Univ. Ulm), Dsoke S. (KIT), Euchner H. (Univ. Tübingen), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M., Groß A., Marinaro M.; **Detailed structural and electrochemical comparison between high potential layered P2-NaMnNi and doped P2-NaMnNiMg oxides**; ACS Applied Energy Materials 2022, 5, 11, 13735-13750; <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c02402>
- / Helder T., Kanevce A., Bauer A., Zinßer M., Paetel S., Friedlmeier T., Powalla M.; **DLTS investigations on CIGS solar cells from an inline co-evaporation system with RbF post-deposition treatment**; EPJ Photovoltaics 13, 7 (2022); <https://doi.org/10.1051/epjpv/2022003>
- / Helder T., Kanevce A., Zinßer M., Gutzler R., Paetel S., Hempel W., Magorian-Friedlmeier T., Powalla M.; **How small changes make a difference: Influence of low silver contents on the effect of RbF-PDT in CIGS solar cells**; Progress in Photovoltaics, published online, 17 Oct. 2022; <https://doi.org/10.1002/ppiv.3628>
- / Hempel W., Friedlmeier T.; **Influence of temperature and sputter source on Cu(In,Ga)Se₂ SIMS depth profiles**; Surface and Interface Analysis, published online, 18 Oct. 2022; <https://doi.org/10.1002/sia.7165>
- / Hoffmann A., Heider E., Dreer C., Pfeifer C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of the mixing and dispersing process on the slurry properties and the microstructure and performance of ultra-thick cathodes for Lithium-ion batteries**; Energy Technology, 2200484 (2022); <https://doi.org/10.1002/ente.202200484>
- / Hogrefe C., Waldmann T., Benavente Molinero M. (PreciPoint), Wildner L. (PreciPoint), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cross-sectional in situ optical microscopy with simultaneous electrochemical measurements for Lithium-ion full cells**; Journal of the Electrochemical Society, 169 (2022) 050519; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6c57>
- / Kanevce A., Essig. C. (Univ. Stuttgart), Paetel S., Hempel W., Hariskos D., Magorian-Friedlmeier T.; **Impact of Ag content on device properties of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; EPJ Photovoltaics 13, 28 (2022); <https://doi.org/10.1051/epjpv/2022026>



- / Kargl P. (Virtual Vehicle Research), Drews V., Daubinger P. (FhG-ISC), Schweighofer O. (Virtual Vehicle Research), Marinaro M., Giffin G. (FhG-ISC), Wohlfahrt-Mehrens M., Thaler A. (Virtual Vehicle Research); **Investigation of voltage and expansion hysteresis of Si-alloy-C/NMC622 pouch cells using dilatometry**; *Journal of Power Sources* Vol. 548, 15 Nov. 2022, 232042; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232042>
- / Khorshidi E. (LMU), Rezaei B. (Isfahan Univ. of Technol.), Blätte D. (LMU), Buyruk A. (LMU), Reus M. (TUM), Hanisch J., Böller B. (LMU), Müller-Buschbaum P. (TUM), Ameri T. (LMU); **Hydrophobic graphene quantum dots for defect passivation and enhanced moisture stability of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ perovskite solar cells**; *Solar RRL*, Vol. 6, Issue 7, July 2022, 220023; <https://doi.org/10.1002/solr.202200023>
- / Khorshidi E. (LMU), Rezaei B. (Isfahan Univ. of Technology), Kavousig-hafarokhi A. (Univ. Putra Malaysia), Hanisch J., Reus M. (TUM), Müller-Buschbaum P. (TUM), Ameri T. (LMU); **Anti-solvent additive engineering for boosting performance and stability of graded heterojunction perovskite solar cells using amide-functionalised graphene quantum dots**; *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14, 49, 54623-54634; <https://doi.org/10.1021/acsami.2c12944>
- / Klass L., Kabza A., Sehnke F., Strecker K., Hölzle M.; **Lifelong performance monitoring of PEM fuel cells using machine learning models**; submitted to *Journal of Power Sources*, Special Issue „Machine Learning and Robotics in the electrochemical energy storage and conversion fields“, 2022; <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4162772>
- / Klein F., Bansmann J. (Univ. Ulm), Jusys Z. (Univ. Ulm), Pfeifer C., Scheitenberger P. (Univ. Ulm), Mundsinger M. (Univ. Ulm), Geiger D. (Univ. Ulm), Biskupek J. (Univ. Ulm), Kaiser U. (Univ. Ulm), Behm R. (Univ. Ulm), Lindén M. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M., Axmann P.; **Enhanced electrochemical capacity of spherical Co-free $\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.6}\text{Ni}_{0.2}\text{O}_2$ particles after a water and acid treatment and its influence on the gas evolution behavior**; *ChemSusChem*, Vol. 15, Issue 20, 21 Oct. 2022, e202201061; <https://doi.org/10.1002/cssc.202201061>
- / Klein F., Pfeifer C., Bansmann J. (Univ. Ulm), Jusys Z. (Univ. Ulm), Behm J. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M., Lindén M. (Univ. Ulm), Axmann P.; **Effect of three-in-one surface modification of spherical, Co-free lithium-rich cathode material for Li-ion batteries ($\text{Li}_{1.2}\text{Mn}_{0.6}\text{Ni}_{0.2}\text{O}_2$) with citric acid**; *Journal of the Electrochemical Society* 169 (2022)120533; <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/aca5c>
- / Köhler S. (Univ. of Applied Sciences Stuttgart), Rongstock R., Hein M. (Aalen Univ. of Applied Sciences), Eicker U. (Concordia Univ. Montreal); **Similarity measures and comparison methods for residential electricity load profiles**; *Energy and Buildings*, 09/2022; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112327>
- / Körte F. (NMI), Wessendorf C., Schnabel T., Herrmann M. (NMI), Schröppel B. (NMI), Stadelmann K. (NMI), Arefaine E. (NMI), Busch L., Daum R. (NMI), Ahlswede E., Hartmann H. (NMI); **Lead-binding biogenic polyelectrolyte multilayer coating for lead retention in perovskite solar cells**; *RSC Advances*, 2022, 12, 34381-34392; <https://doi.org/10.1039/d2ra05692e>
- / Kollenda A. (TUM), Husseini K. (KIT), Henschel S. (KIT), Schmidgruber N. (KIT), Becker-Koch D., Braunwarth W., Daub R. (TUM); **Quality assurance for flexible stack assembly of lithium-ion cells**; *Energy Technology*, published online 6 Jan. 2023; <https://doi.org/10.1002/ente.202201059>
- / Koprek M., Schlumberger R. (Audi AG), Wachtel C. (Audi AG), Wilhelm F., Messerschmidt M., Scholta J., Hölzle M.; **Local ageing effects of polymer electrolyte fuel cell membrane electrode assemblies due to accelerated durability testing**; *Fuel Cells*, 6/2022, p. 271-283; <https://doi.org/10.1002/fuce.202200064>
- / Kucinskis G., Bozorgchenani M., Feinauer M., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M., Waldmann T.; **Arrhenius plots for Li-ion battery ageing as a function of temperature, C-rate and ageing state - An experimental study**; *Journal of Power Sources*, Vol. 549, 30 Nov. 2022, 232129; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232129>
- / Mancini M., Martin J., Ruggeri I., Drewett N. (CIC energiGUNE), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Enabling fast-charging lithium-ion battery anodes: Influence of spheroidization on natural graphite**; *Batteries & Supercaps*, Vol. 5, Issue 7, July 2022, e202200109; <https://doi.org/10.1002/batt.202200109>
- / Marinaro M., Dsoke S. (KIT); **Advances in nanomaterials for Lithium-ion/post-Lithium-ion batteries and supercapacitors**; *Nanomaterials* 2022, 12(15), 2512; <https://doi.org/10.3390/nano12152512>
- / Marini E., Liebert M., Rossi F. (Univ. of Salento), Oliviera De Souza D. (Elettra), Baumli P. (Stanford Univ.), Aquilanti G. (Elettra), Regnet F., Lüdeking I., Bozzini B. (Politecnico di Milano), Jörissen L., Brimaud S.; **Mapping of the degradation processes at bifunctional O_2 gas diffusion electrode for aqueous alkaline metal-air batteries**; *Journal of Power Sources*, Vol. 546, 30 Oct. 2022, 231879; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231879>



- / Maroni F., Spreafico M. (E-magy), Schönecker A. (E-magy), Wohlfahrt-Mehrens M., Marinaro M.; **Near-zero volume expansion of nanoporous silicon as anode for Li-ion batteries**; Journal of the Electrochemical Society, 169 (2022) 080506; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac8628>
- / Montoya-Gómez M., Paetel S., Hempel W., Kanevce A., Magorian-Friedlmeier T., Hariskos D.; **Impact of additives on the chemical bath deposition of Zn(O,S) used as buffer layer in high-efficiency Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells**; Thin Solid Films, Vol. 765, 31 Jan. 2023, 139636; <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139636>
- / Nejad B. (KIT), Ritzer D. (KIT), Hu H. (KIT), Schackmar F. (KIT), Moghadamzadeh S. (KIT), Feeney T. (KIT), Singh R. (KIT), Laufer F. (KIT), Schmagar R. (KIT), Azmi R. (KIT), Kaiser M. (KIT), Abzieher T. (KIT), Gharibzadeh S. (KIT), Ahlswede E., Lemmer U. (KIT), Richards B. (KIT), Paetzold U. (KIT); **Scalable high-efficiency two-terminal all-perovskite tandem solar modules with a 19.1% efficiency**; Nature Energy 7, 620-630 (2022); <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01059-w>
- / Pfeiffer L., Jobst N., Gauckler C., Lindén M. (Univ. Ulm), Marinaro M., Passerini S. (HIU), Wohlfahrt-Mehrens M., Axmann P.; **Layered P₂-Na_xMn_{3/4}Ni_{1/4}O₂ cathode materials for sodium-ion batteries: Synthesis, electrochemistry and influence of ambient storage**; Frontiers in Energy Research, 2022, 10:910842; <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.910842>
- / Prifling B. (Univ. Ulm), Neumann M. (Univ. Ulm), Hein S. (DLR), Danner T. (DLR), Heider E., Hoffmann A., Rieder P. (Univ. Ulm), Hilger A. (HZB), Osenberg M. (TU Berlin), Manke I. (HZB), Wohlfahrt-Mehrens M., Latz A. (DLR), Schmidt V. (Univ. Ulm); **Quantitative comparison of different approaches for reconstructing the carbon-binder domain from tomographic image data of cathodes in lithium-ion batteries and its influence on electrochemical properties**; Energy Technology, 2200784 (2022); <https://doi.org/10.1002/ente.202200784>
- / Radloff S., Carbonari G., Scurtu R., Hölzle M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Fluorine-free water-based Ni-rich positive electrodes and their performance in pouch- and 21700-type cells**; Journal of Power Sources, Vol. 553, 1 Jan. 2023, 232253; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232253>
- / Radloff S., Scurtu R., Hölzle M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Water-based LiNi_{0.83}Co_{0.12}Mn_{0.05}O₂ electrodes with excellent cycling stability fabricated using unconventional binders**; Journal of the Electrochemical Society, 169 (2022) 040514; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6324>
- / Raghuwanshi M. (RWTH Aachen), Cugh M. (Univ. Paderborn), Sozzi G. (Univ. Parma), Kanevce A., Kühne T. (Univ. Paderborn), Mirhosseini H. (Univ. Paderborn), Würz R., Cojocar-Mirédin O. (RWTH Aachen); **Fingerprints indicating superior properties of internal interfaces in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; Advanced Materials, Vol. 34, Issue 37, Sept. 2022, 22039454; <https://doi.org/10.1002/adma.202203954>
- / Scheer D. (KIT), Dreyer M. (Dialogik), Schmidt M., Schmieder L. (KIT), Arnold A. (Zirius); **The Integrated Policy Package Assessment approach: Elaborating ex ante knowledge in the field of urban mobility**; Energy, Sustainability and Society, 12 (2022); <https://energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-022-00362-4>
- / Schmid M., Wagner T., Wiedemann B., Scholta J.; **Effects of impurities in the cathode airflow on proton exchange membrane fuel cell stacks**; Fuel Cells, 6/2022, p. 254-270; <https://doi.org/10.1002/fuce.202200063>
- / Schmidt M., Schindler D. (Univ. Freiburg), Arneht A. (KIT), Löbbe S. (HS Reutlingen), Pehnt M. (ifeu), Kesselring S. (HfWU), Liebhart L., Jung C. (Univ. Freiburg), Laimer T. (KIT), Hackbarth A. (HS Reutlingen), Ortner S. (ifeu), Seibt C. (HfWU); **Stellungnahme des Klima-Sachverständigenrats zum Entwurf des Klimaschutz- und Klimawandelanpassungsgesetzes (KlimaG)**; 31.10.2022; https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/4_Klima/Klimaschutz/Klima-Sachverstaendigenrat/Stellungnahme-Klima-Sachverstaendigenrat-Entwurf-KlimaG-barrierefrei.pdf
- / Schüler P. (Univ. Jena), Sengupta S. (Univ. Jena), Zaubitzer S., Fiesinger F. (Univ. Ulm), Dongmo S., Görls H. (Univ. Jena), Wohlfahrt-Mehrens M., van den Borg M. (Univ. Ulm), Gaissmaier D. (Univ. Ulm), Kriek S. (Univ. Jena), Marinaro M., Jacob T. (Univ. Ulm), Westerhausen M. (Univ. Jena); **Suitability of carbazolyl Hauser and turbo-Hauser bases as magnesium-based electrolytes**; European Journal of Inorganic Chemistry 17 (2022) e202200149; <https://doi.org/10.1002/ejic.202200149>

// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

- / Staiß F., Adolf J. (Shell), Ausfelder F. (Dechema), Erdmann C. (Messer), Fishedick M. (Wuppertal Inst.), Helbing C. (FhG-ISE), Jordan T. (KIT), Klepper G. (IfW), Müller T. (Stiftung Umweltenergierecht), Palkovits R. (RWTH Aachen), Proganietz W. (KIT), Schill W. (DIW), Schmidt M., Stephanos C. (ESYS), Stöcker P. (RWTH Aachen), Wagner U. (TUM), Westphal C. (H2 Global), Wurbs S. (ESYS); **Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030 - Transportwege, Länderbewertungen, Realisierungserfordernisse**; Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, Leopoldina/acadtech/akademieunion, München, August 2022; https://doi.org/10.48669/esys_2022-6
- / Thomas S. (HZB), Bertram T. (HZB), Kaufmann C. (HZB), Kodalle T. (HZB), Prieto J. (HZB), Hempel H. (HZB), Choubrac L. (HZB), Witte W., Hariskos D., Mainz R. (HZB), Carron R. (Empa), Keller J. (Univ. of Uppsala), Reyes-Figueroa (HZB), Klenk R. (HZB), Abou-Ras D. (HZB); **Effects of material properties of band-gap-graded Cu(In,Ga)Se₂ thin films on the onset of the quantum efficiency spectra of corresponding solar cells**; Progress in Photovoltaics, Vol. 30, Issue 10, Oct. 2022, 1238-1246; <https://doi.org/10.1002/pip.3572>
- / Tran H. Y., Lindner A. (KIT), Menesklow W. (KIT), Braunwarth W.; **Toward calenderability of high-energy cathode based on NMC622 during the roll-to-roll process**; Energy Technology, published online, Jan. 2023; <https://doi.org/10.1002/ente.202201092>
- / Waldmann T., Scurtu R., Brändle D., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Effects of tab design in 21700 Li-ion cells - Improvements of cell impedance, rate capability, and cycling aging**; Energy Technology, 2200583 (2022); <https://doi.org/10.1002/ente.202200583>
- / Wands J. (Mines), Kanevce A., Bothwell A. (NREL), Miller M. (Ohio State Univ.), Paetel S., Arehart A. (Mines), Rocket A. (Mines); **Evaluating recombination mechanisms in RbF treated Cu(In_xGa_{1-x})Se₂ solar cells**; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, Issue 6, Nov. 2022; <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3197926>
- / Witte W., Hempel W., Paetel S., Menner R., Hariskos D.; **Influence of sputtered gallium oxide as buffer or high-resistive layer on performance of Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells**; Journal of Materials Research, 37, 1825-1834 (2022); <https://doi.org/10.1557/543578-022-00608-z>
- / Yesilyurt O. (IPA), Brandt D. (IPA), Grimm J. J. (IPA), Hussein K. (KIT), Naumann A. (TU Braunschweig), Meiners J. (TU Braunschweig), Becker-Koch D.; **Development of a standardized and semantic database model for smart battery cell manufacturing**; Proceedings of the 11th International Conference on Data Science, Lisbon (2022) p. 13-20; <https://doi.org/10.5220/0011139500003269>
- / Zaubitzer S., Dongmo S., Schüler P. (Univ. Jena), Kriek S. (Univ. Jena), Fiesinger F. (Univ. Ulm), Gaissmaier D. (Univ. Ulm), van den Borg M. (Univ. Ulm), Jacob T. (Univ. Ulm), Westerhausen M. (Univ. Jena), Wohlfahrt-Mehrens M., Marinaro M.; **A novel and highly efficient indolyl-based electrolyte for Mg batteries**; Energy Technology, 2200440 (2022); <https://doi.org/10.1002/ente.202200440>
- / Zillner J., Boyen H.-G., (University Hasselt), Schulz P. (CNRS), Hanisch J., Gauquelin N. (Univ. of Antwerp), Verbeeck J. (Univ. of Antwerp), Küffner J., Desta D. (University Hasselt), Eisele L., Ahlswede E., Powalla M.; **The role of SNF₂ additive on interface formation in all lead-free FASnI₃ perovskite solar cells**; Advanced Functional Materials, Vol. 32, Issue 28, 11 July 2022, 2109649; <https://doi.org/10.1002/adfm.202109649>
- / Zinßer M., Braun B., Helder T., Friedlmeier T., Pieters B. (FZJ), Heinlein A. (TU Delft), Denk M. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Göddeke D. (Univ. of Stuttgart), Powalla M.; **Irradiation-dependent topology optimization of metallization grid patterns and variation of contact layer thickness used for latitude-based yield gain of thin-film solar modules**; MRS Advances 7, 706-712 (2022); <https://doi.org/10.1557/543580-022-00321-3>
- / Zinßer M., Helder T., Bauer A., Magorian Friedlmeier T., Zillner J., Becker J.-P., Powalla M.; **Optical and electrical loss analysis of thin-film solar cells combining the methods of transfer-matrix and finite elements**; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, Issue 6, July 2022, 1154-1161; <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3190770>
- / Zinßer M., Loy M., Helder T., Bauer A., Magorian Friedlmeier T., Powalla M.; **Finite element simulation of electrical intradevice physics of thin-film solar cells and its implications on the efficiency**; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 12, Issue 2, March 2022, 483-492; <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3143453>



/ VERÖFFENTLICHUNGEN AUF WISSENSCHAFTLICHEN KONFERENZEN, WORKSHOPS UND SYMPOSIEN
PUBLICATIONS AT SCIENTIFIC CONFERENCES, WORKSHOPS AND SYMPOSIA

- / Bauer M., Becher D., Döring H., Böse O.; **Possibilities to suppress the thermal propagation in lithium-ion cell modules**; Battery Experts Forum, Messe Frankfurt, 14.7.2022
- / Becker-Koch D., Braunwarth W.; **Smarte Batteriezellproduktion als Innovationsmotor für den Standort Deutschland**; Fachkonferenz Digitalisierung (INNEO 2022), Messe Stuttgart, 11.5.2022
- / Brellocks J.; **Technologien zur Klärschlammverbrennung – Eine Zusammenfassung**; 2. Regionalkonferenz Region Nord, Plattform P-Rück Baden-Württemberg, DWA-Online, 27.1.2022
- / Brellocks J.; **Technikumsanlage am ZSW / Das P-XTRACT-Projekt**; 8. P-Rück-Kongress: Phosphor – ein kritischer Rohstoff mit Zukunft, Stuttgart, 23.–24.11.2022
- / Brimaud S.; **NiZn battery: Developments and potential for off-grid storage**; Intersolar Europe, Messe München, 11-13 May 2022
- / Brimaud S.; **NiZn batteries: Developments and potential for off-grid storage**; Off-Grid Expo, Augsburg, 1.12.2022
- / Brinner A.; **Wasserstoffherzeugung und Betriebssicherheit**; R. Stahl-Expertenforum, Friedewald, 26.–28.4.2022
- / Brinner A.; **Grundlagen der Wasserelektrolyse**; Vorlesung Wasserstofftechnologie, IGTE, Universität Stuttgart, 31.5.2022
- / Haugk B., Löffler M.-S., Schmidt M.; **Elektrolyse – Der Markthochlauf hat begonnen**; TAE-Symposium, Esslingen, 7.11.2022
- / Holl S., Spieth P., Marquard-Möllenstedt T.; **Bedeutung der Galvanotechnik für die Wasserelektrolyse**; ZVO Oberflächentage, Leipzig, 14.–16.9.2022
- / Keppeler M.; **Recycling of electrode rejects**; Tagung Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus, online, 22.3.2022
- / Keppeler M.; **The role of pilot lines in bridging the gap between fundamental research and industrial production for Lithium ion battery cells**; Tagung Querschnittsinitiative Batterie-Lebenszyklus, Aachen, 30.6.2022
- / Löffler M., Hölzle M.; **Elektrolyse und Brennstoffzelle – Zwei Schlüsseltechnologien des Wasserstoffzeitalters gehen in Serie**; Netzwerk Wasserstoff der IHK Schwaben, Augsburg, 8.3.2022
- / Löffler M., Püttner A.; **Wasserstoff-Erzeugung mit Technologien und Wertschöpfung aus Baden-Württemberg**; Württembergische Landesbibliothek – Vortragsreihe Wasserstoff, Stuttgart, 17.11.2022
- / Menger L., Leukauf D., Klar N., Strecker K., Felder M., Kaifel A.; **Project ParkCast: AI methods for short term wind power forecast**; International RAVE Workshop 2022, online, 3 Feb. 2022; https://rave-offshore.de/files/downloads/konferenz/Internationaler%20RAVE%20Workshop%202022/Presentations%20WS%202022/ZSW_RAVE2022_komprimiert.pdf
- / Schmidt D. (FhG-IEE), Brinner A., Estevam-Schmiedt J. (DLR), Styri-Hipp G. (FhG-ISE), Chhugani B. (ISFH), Hoffmann P. (IZES), Wagner O. (Wuppertal Institut); **Umsetzung der urbanen Wärmewende im Quartier**; FVEE-Jahrestagung 2022, Forschung für die Wärmewende, Berlin, 12.10.2022
- / Schmidt M.; **Erneuerbare Energien**; 4 π Symposium, Energie – Klima – Bevölkerung, Konstanz, 13.–14.5.2022
- / Schmidt M.; **Wasserstoff – Die Technik der Zukunft?!**; ISWA-Politikseminar, Berlin, 7.–8.11.2022
- / Schmidt M.; **Wege zur Treibhausgasneutralität in Baden-Württemberg – Erforderliche Entwicklung der erneuerbaren Stromversorgung vor dem Hintergrund gesetzlicher Ziele**; EEG-/KWKG-Informationsveranstaltung der transnet BW, Stuttgart, 16.11.2022
- / Schmidt M.; **A roadmap for reFuels for Baden-Wuerttemberg - A strategy for more climate protection and energy security**; Baden-Wuerttemberg Automotive Industry Strategy Dialogue Conference, Brussels, 17 Nov. 2022
- / Serre G. (CEA), Escribano S. (CEA), Guétaz S. (CEA), Wilhelm F., Schmid M., Casalegno A. (Politecnico di Milano), Barrici A. (Politecnico di Milano), Colombo E. (Politecnico di Milano); **Macroscopic simulation of 1000 PEMFC ageing systems**; 18th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (MO-DVAL 2022), Hohenkammer, 14-16 March 2022
- / Staiß F.; **Transportoptionen für den Import von grünem Wasserstoff per Tanker und Pipeline nach Deutschland**; acatech/Dechema, Auf dem Weg zur H₂-Roadmap: Impulse aus dem Wasserstoff-Kompass, Online-Konferenz, 22.2.2022
- / Staiß F.; **Wasserstoff als Schlüssel für das Erreichen der Klimaneutralität**; Württembergische Landesbibliothek, Vortragsreihe Wasserstoff, Stuttgart, 27.9.2022
- / Staiß F.; Kienzlen V. (KEA); **Klimaneutrales Baden-Württemberg 2040: Wie kann das gehen?**; Energiepolitisches Forum von KEA und ZSW, Stuttgart, 12.7.2022
- / Stöcker P. (RWTH), Stemmler C. (acatech), Schmidt M., Stephanos C. (Acatech), Wurbs S. (acatech), Staiß F., Sauer D.-U. (RWTH); **Comparing options for hydrogen-based imports - Cost and efficiency**; Aachen Hydrogen Colloquium 2022, Aachen, 3-4 May 2022
- / Zuberbühler U., Brinner A.; **Power-to-Hydrogen**; Vorlesung Wasserstofftechnologie, IGTE, Universität Stuttgart, 31.5.2022

// Bildlegenden

Captions

Titelseite: Elektrodenpackage der alkalische Wasser-Elektrolyse mit Membran, Zellrahmen und Membranring	Cover: Electrode package of alkaline water electrolysis with membrane, cell frame and membrane ring
S. 4/5: CIGS-Dünnschichtsolarmodule	P. 4/5: CIGS thin-film solar modules
S. 6: Elektrodenpackage	P. 6: Electrode package
S. 8/9: Brennstoffzellenstack und Komponenten im Forschungsformat/	P. 8/9: Research-format fuel cell stack and components
S. 14/15: CIGS-Dünnschichtsolarmodule	P. 14/15: CIGS thin-film solar modules
S. 34/35: Forschungs-Brennstoffzellenstack, Elektrolyse-Komponenten: Elektrodenpackage, Tellerfeder, Spannelemente	P. 34/35: Fuel cell stack, components of electrolysis: electrode package, disc spring, clamping elements
S. 74/75: Forschungs-Brennstoffzellenstack, Führungshülse für Spannelemente eines Elektrolyseblocks, CIGS-Zelle, Flowfield, Membran und Batterien	P. 74/75: Fuel cell stack; guide sleeve for clamping elements of an electrolysis block, CIGS cell, flowfield, membrane and batteries
S. 84/85: Batteriezellen in verschiedenen Zelldesigns	P. 84/85: Battery cells in different cell designs

// Standorte

Locations

// STUTT GART

Ansprechpartnerin Stuttgart / Contact

Petra Nikolić

Phone: +49 711 7870-315

E-mail: petra.nikolic@zsw-bw.de

Ansprechpartnerin Ulm / Contact

Tiziana Bosa

Phone: +49 731 9530-601

E-mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de



Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart

- STUTT GART ●
- WINDTESTFELD SCHWÄBISCHE ALB ●
- SOLARTESTFELD WIDDERSTALL ●
- ULM ●

// ULM



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

// WINDTESTFELD SCHWÄBISCHE ALB



// SOLARTESTFELD WIDDERSTALL



Widderstall 14
89188 Merklingen

// ULM ELAB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

// ULM HYFAB



// Abkürzungen

Abbreviations

// FIRMEN, INSTITUTE, INSTITUTIONEN

// COMPANIES, INSTITUTES, INSTITUTIONS

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
ACS	American Chemical Society
AHK	Auslandshandelskammer
BGSU	Bowling Green State University
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung / German Federal Ministry of Education and Research
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BW	Baden-Württemberg
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CELEST	Center for Electrochemical Storage Ulm & Karlsruhe
CEP	Clean Energy Partnership
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
EFCF	European Fuel Cell Forum
EFRE	Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung
eLaB	ZSW-Labor für Batterietechnologie / ZSW Laboratory for Battery Technology
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
ERDF	European Regional Development Fund
EU PVSEC	European PV Solar Energy Conference and Exhibition
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FhG-IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
FhG-ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
FZJ	Forschungszentrum Jülich GmbH
HI MS	Helmholtz-Institut Münster
HyFaB	ZSW-Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen / ZSW Research Factory for Hydrogen and Fuel Cells
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHK	Industrie- und Handelskammer
IMEC	Interuniversity Microelectronics Center
IMP UB RAS	M.N. Miheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences
INL	International Iberian Nanotechnology Laboratory
IPVF	Institut Photovoltaïque d'Île-de-France
IREC	Institut de Recerca en Energia de Catalunya / Catalonia Institute for Energy Research
ISFH	Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal
ISO	International Organization for Standardization
KIT	Karlsruher Institut für Technologie / Karlsruhe Institute of Technology
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
KSG	Klimaschutzgesetz Baden-Württemberg
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MDPI	Multidisciplinary Digital Publishing Institute
MPI	Max-Planck-Institut
MPI-FKF	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung
MRS	Materials Research Society
PGS	Institute for Power Generation and Storage Systems, RWTH
POLiS	Post Lithium Storage
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SAE	Society of Automotive Engineers
SME	Small and Medium-sized Enterprises
TU	Technische Universität

UECT	Ulmer Elektrochemische Tage / Ulm ElectroChemical Talks
UNLV	University of Nevada Las Vegas
VDE ETG	Energietechnische Gesellschaft im Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDMA	Verband der Maschinen- und Anlagenbauer e. V.
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süddeutschland / Wind Energy Research Cluster
WUT	Warsaw University of Technology

// FACHBEGRIFFE

// TECHNICAL TERMS

ACIGS	Silber-Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
AI	Artificial Intelligence
ARC	Anti-Reflective Coating / Antireflexbeschichtung
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
CP	Charging Point / Ladepunkt
DMF	Dimethylformamid / Dimethylformamide
DMSO	Dimethylsulfoxid / Dimethylsulphoxide
DT	Digital Twin
DZ	Digitales Zwilling
FF	Fill Factor / Füllfaktor
FIB-SEM	Focused Ion Beam – Scanning Electron Microscope
Jsc	Short-Circuit Current Density / Kurzschlussstromdichte
LNG	Liquefied Natural Gas
LT-PEM	Low-Temperature Polymer Electrolyte Membrane / Niedertemperatur-Polymer-Elektrolyt-Membran
MA	Methylammonium
MBE	Molecular Beam Epitaxy / Molekularstrahl-Epitaxie
MEA	Membrane Electrode Assembly / Membran-Elektroden-Einheit
μ-CT	Mikro-Computertomographie / Micro-Computed Tomography
nRMSE	normalised Root Mean Square Error / normierter mittlerer quadratischer Fehler
NT-PEM	Niedertemperatur-Polymer-Elektrolyt-Membran
P2X	Power-to-X
PCE	Power Conversion Efficiency / Wirkungsgrad
PEDOT:PSS	Poly(3,4-Ethylenedioxythiophen) Polystyrene Sulfonate / Poly-(3,4-Ethylenedioxythiophen)-Poly-Styrolsulfonat
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran / Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell / Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PLP	Prosumerlastprofil / Prosumer Load Profile
PV	Photovoltaik / Photovoltaics
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SEM	Scanning Electron Microscope
SLP	Standardlastprofil / Standard Load Profile
TCO	Transparent Conductive Oxide
TOVS	TIROS Operational Vertical Sounder
VOC	Open-Circuit Voltage / Leerlaufspannung

// 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
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
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.
ESPP	European Sustainable Phosphorus Platform
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
H2 Süd	H2 Süd e. V. – Die Wasserstoff Initiative Bayern & Baden-Württemberg
Hy-Five	Modellregion Grüner Wasserstoff e. V.
Hydrogen Europe	Hydrogen Europe Research
innBW	Innovationsallianz Baden-Württemberg
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.
OpenEMS	OpenEMS Association e. V.
PEE	Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e.V.
performing energy	Fachkommission des DWV e. V. Power-to-Fuel
Plattform P-Rück	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 im VDMA
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süddeutschland

// Impressum
// Imprint

// Herausgeber Publisher
 Zentrum für Sonnenenergie-
 und Wasserstoff-Forschung
 Baden-Württemberg (ZSW)

Meitnerstr. 1
 70563 Stuttgart
 Phone: +49 711 7870-0
 E-mail: info@zsw-bw.de

// Redaktion Editorial Team
 Petra Nikolić
 (verantwortlich / chief editor)
 Tiziana Bosa
 Julia Fromm
 Gudrun Scherg

// Übersetzungen Translation
 Elisabeth Noske
 Gillian Christine Gingell

// Layout & Satz Layout & Setting
 Sieber & Wolf Werbeagentur
 Hofgut Mauer 1
 70825 Korntal-Münchingen

// Druck Print
 Print Media Solutions GmbH
 Weinheimer Str. 62
 68309 Mannheim

// Fotos Photos
 David Arzt
 Adobe Stock
 Harald Dietz (S./p. 33)
 DLR Grafik ElyLab (S./p. 51)
 Martin Duckek (S./p. 10 / 13 / 61 / 77 / 101)
 FVV / Dirk Lässig (S./p. 69)
 e-mobil BW GmbH / Dieter Mayer (S./p. 78)
 Ellen Klose (S./p. 80)
 Messe Stuttgart (S./p. 79)
 tubesolar (S./p. 41)
 ZG Architekten (S./p. 13)



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.

Stuttgart

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Germany
Phone: +49 711 7870-0
Fax: +49 711 7870-100

Solar-Testfeld Widderstall

Widderstall 14
89188 Merklingen
Germany
Phone: +49 7337 92394-0
Fax: +49 7337 92394-20

Ulm

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-0
Fax: +49 731 9530-666

Ulm eLaB

Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-500
Fax: +49 731 9530-599

www.zsw-bw.de



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