

// Ergebnisse
Results

2021

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 2021 / Achievements in 2021
14	Schwerpunktbericht / Focus Report 20 Jahre KI am ZSW: Pionierarbeit mit Wirkung 20 years of AI at the ZSW: pioneering work with impact
34	Fachgebiete und Projekte / 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
58	Akkumulatoren / Accumulators
60	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
64	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
68	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
70	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
78	Dokumentation / Documentation
80	Finanzbericht / Financial Information
82	Personalentwicklung / People Development
84	Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
88	Organigramme / Organisational Structure
90	Standorte / Locations
92	Abkürzungen / Abbreviations
93	Impressum / Imprint

// Vorwort

Wir befinden uns in einer Zeitenwende, die auch eine Neuausrichtung der Energieversorgung erforderlich macht. Ein schneller Ausbau von Photovoltaik, Windenergie und Elektromobilität ist ebenso dringend wie der Markthochlauf der Wasserstofftechnologien. Dazu leistet das ZSW seit mehr als 30 Jahren einen wichtigen Beitrag und wird seine Arbeit auf diesen Gebieten noch intensivieren.

Der diesjährige Schwerpunktbericht befasst sich mit dem Thema Künstliche Intelligenz (KI), zu dem am ZSW seit mehr als 20 Jahren geforscht wird und das sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Pfeiler unserer Arbeit entwickelt hat. Mit Methoden der Künstlichen Intelligenz lassen sich komplexe Aufgabenstellungen lösen: von der Materialanalytik und Produktionsoptimierung über die Qualitätssicherung technischer Komponenten und Systeme bis zur Optimierung klimaneutraler Energiesysteme. Damit unterstützen wir kleinere, mittlere und größere Unternehmen beim Aufbau neuer KI-basierter Geschäftsfelder. Darüber hinaus präsentiert der Jahresbericht weitere Highlights: von Perovskit-Solarzellen bis zum Schutz von windenergiesensiblen Vogelarten, vom Batteriezellen-Recycling bis zum elektrischen Fliegen mit Brennstoffzellen, von der Elektrolysetechnologie bis zur strategischen Systemanalyse.

Wir freuen uns über das große Interesse an unseren Forschungsarbeiten, das wir seitens der Medien, aber auch in vielen persönlichen Gesprächen erfahren dürfen. Dies ist das Verdienst aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, für deren großartigen Einsatz wir uns bedanken. Unser Dank gilt auch den Mitgliedern des Kuratoriums und dessen Vorsitzendem, Prof. Christian Mohrdieck. Dem Land Baden-Württemberg danken wir für die finanzielle Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit ebenso wie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

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

// Foreword

We are at a turning point in history and at a crossroad where we need to take a new direction in relation to the supply of energy. The rapid expansion of photovoltaics, wind energy and electromobility is just as urgent as the acceleration of growth in the hydrogen market. The ZSW has been making a key contribution to these technologies for more than 30 years and is set to step up its work in these fields.

This year's focus report is about artificial intelligence (AI) which has been a subject of research at the ZSW for more than 20 years and which has become fundamental to our work in recent years. Artificial intelligence methods can be used to solve complex problems, ranging from the analysis of materials, the improvement of production processes and quality control for technical components and systems right through to the optimisation of climate-neutral energy systems. We support small, medium-sized and large enterprises in setting up new AI-based operations. Other highlights in the annual report include the development of perovskite solar cells, the protection of bird species vulnerable to wind energy systems, the recycling of battery cells, the use of fuel cells for electric aviation, the application of electrolysis technology and the strategic analysis of systems.

We are delighted to sense such great interest in our research work from the media and also in many personal conversations. All the employees deserve to take the credit for the attention we receive and we would like to express our gratitude for their hard work and commitment. We would also like to thank the members of the Board of Trustees and its Chair, Prof. Christian Mohrdieck. Thanks are also due to the state of Baden-Württemberg for the financial support and excellent cooperation, and to our partners from enterprise, public research funding and science.

We hope you enjoy reading the ZSW Annual Report!



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Michael Powalla

// Prof. Dr. Markus Hölzle



// Leitbild des ZSW

// Energie mit Zukunft

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

// Wissenschaft mit klarem Fokus

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

// Technologietransfer schafft Arbeitsplätze

Als industrieorientiertes Forschungsinstitut ebnen wir neuen Technologien den Weg in den Markt. Von der Materialforschung über die Entwicklung von Prototypen und Produktionsverfahren bis hin zu Anwendungssystemen, Qualitätstests und Marktanalysen decken wir die gesamte Wertschöpfungskette ab. Diese

Expertise aus einer Hand ist für unsere Partner aus der Wirtschaft ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

// 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

// Foto: Adobe Stock / agsandrew

// 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. 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 so doing, win support for their practical application and help shape the energy supply of the future.

// Stiftung

// Foundation

// Foto: Adobe Stock / metamoreworks

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.“

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.”

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.

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
- > Dr.-Ing. Ronny Feuer, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Karl Greißing, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus, 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 Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH
- > Prof. Dr.-Ing. Manfred Fishedick, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- > Prof. Dr. Angelika Heinkel
- > 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

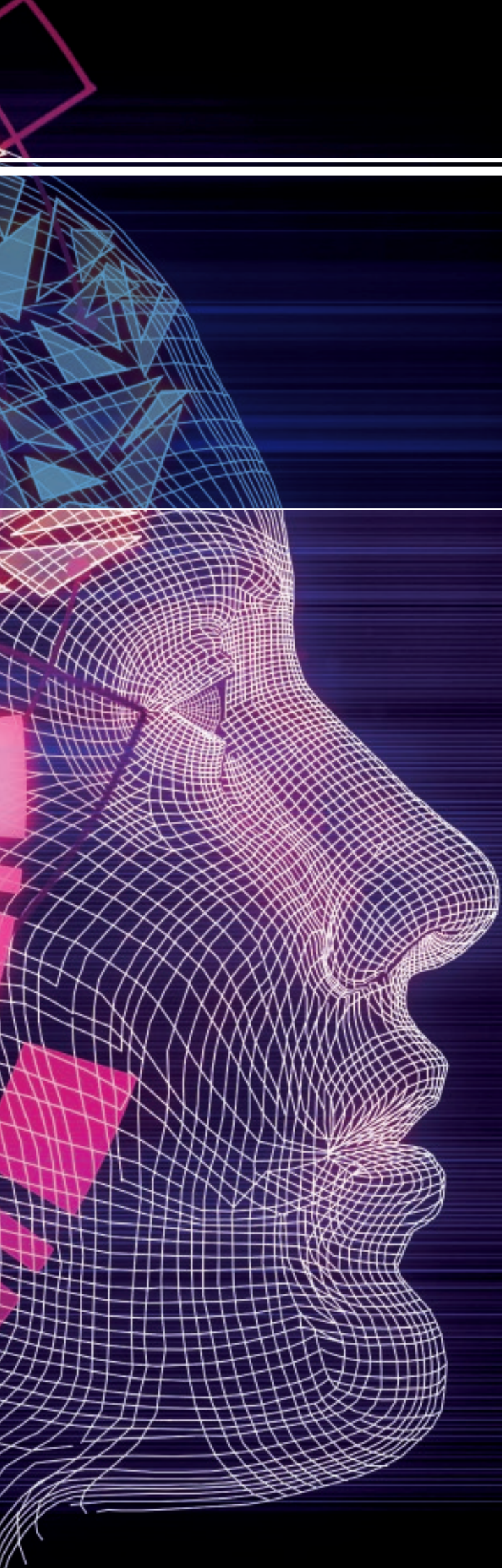
Wirtschaft / Commercial enterprises

- > Dipl.-Ing. (FH) Armin Diez, ElringKlinger AG
- > 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



// Erfolge 2021

// Achievements in 2021



// Erfolge 2021

// Achievements in 2021

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, effizient mit Energie umzugehen und den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen, um dadurch zu einer nachhaltigen Energieversorgung beizutragen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW, indem es neue und verbesserte Energietechnologien entwickelt und sie gemeinsam mit Industriepartnern marktreif macht.

Auch 2021 wurden am ZSW wieder viele Erfolge in den Themenschwerpunkten erzielt.

“Energy with a future” describes the goal of using energy more efficiently and increasing the share of renewable energy generation in order to contribute to a sustainable energy supply. ZSW is pursuing this goal by developing new and improved energy technologies and ensuring their transfer to the market, together with industrial partners.

In 2021, excellent results were once again achieved in the key areas.

// HYFAB – GEBÄUDE 1 IST BEZUGSFÄHIG

Am 09.02.21 starteten die Bauarbeiten zur Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen (HyFaB) am ZSW in Ulm. Nach nur 15 Monaten ist der Neubau mit 3.300 Quadratmetern für das Brennstoffzellentestzentrum bezugsfähig. Das Gebäude wird vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit 10,5 Millionen Euro gefördert. 2022 geht es mit HyFaB-2 weiter: Ein Neubau für eine Brennstoffzellenmodellfabrik mit Produktionshalle und angrenzendem Seminartrakt, wo Komponenten und Fertigungsprozesse für den Brennstoffzellenstapel (Stack) entwickelt werden sollen, entsteht direkt daneben. Brennstoffzellen sind wichtig für einen klimaneutralen Schwerlastverkehr. Die Technik gibt es längst, jedoch werden die Energiewandler bislang kostenintensiv von Hand gefertigt. Sie zügig in die Serienproduktion zu bringen, Kosten zu senken und den wachsenden Markt bedienen zu können, ist das Ziel von HyFaB.

// HYFAB BUILDING READY FOR OCCUPANCY

Construction work on the research factory for hydrogen and fuel cells (HyFaB) in Ulm started on 9.2.2021. After only 15 months, the new building is ready to move into and boasts an area of 3,300 square metres for the fuel cell test centre. The project has been allocated 10.5 million euro in funds by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs. 2022 will see the continuation of the work in HyFaB-2 right next door where there will be a new fuel cell model factory building with seminar rooms and production facility, earmarked for the development of components and manufacturing processes for fuel cell stacks. Fuel cells are important for climate-neutral heavy goods traffic. The technology is not new but the energy converters have been manufactured by hand until now, making the process expensive. The aims of HyFaB are to expedite series production, to reduce costs and to be able to serve the growing market.



// HyFaB-Bauabschnitt 1: Brennstoffzellentestzentrum, Bürotrakt, Gaselager, im Hintergrund das eLaB.
// HyFaB construction phase 1: fuel cell test centre, office wing, gas store, and the eLaB in the background.



// 20 Millionen für Powder-Up! V. l.: Markus Hölzle (ZSW-Vorstand Ulm), Peter Axmann (Projektleiter), Engelbert Beyer (BMBF) und Margret Wohlfahrt-Mehrens (Leiterin der Batterieforschung am ZSW).
 // 20 million for Powder-Up! (from left to right: Markus Hölzle (ZSW Member of the board), Peter Axmann (Project Manager), Engelbert Beyer (BMBF) and Margret Wohlfahrt-Mehrens (Head of Battery Research at the ZSW).

// POWDER-UP!: KATHODENMATERIALIEN IN CHARGEN BIS 100 KILOGRAMM

Kathodenmaterialien der nächsten Generation werden in Deutschland noch nicht im industriellen Maßstab hergestellt. Für Forschungseinrichtungen ist es daher nahezu unmöglich, diese in Batteriezellen zu bringen. Mit Powder-Up! errichtet das ZSW in Ulm bis Ende 2022 eine Pilotanlage zur Herstellung derartiger Kathodenmaterialien für zukünftige Lithium-Ionen-Batterien. In der neuen Powder-Up!-Anlage können Materialchargen bis zu 100 Kilogramm hergestellt werden. Wissenschaftliche Partner in Deutschland und Europa sowie Partner aus der Industrie können die am ZSW hergestellten Kathodenmaterialien künftig für den Einsatz auf ihren Pilotanlagen nutzen. Damit wird eine gravierende Lücke in der wissenschaftlichen Landschaft in Deutschland geschlossen. Ministerialrat Engelbert Beyer vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) übergab den Förderbescheid in Höhe von 20 Millionen Euro am 03.11.2021.

// MODELLREGIONEN HY-FIVE UND GENESIS

Baden-Württemberg hat zwei „Modellregionen Grüner Wasserstoff“ gewählt. „Hy-FIVE“ der Stadt Ulm, des Landkreises Reutlingen und des Alb-Donau-Kreises und „H₂ GeNeSiS“ von der Wirtschaftsförderung Region Stuttgart. Das ZSW partizipiert in beiden Vorhaben: Mit Hy-FIVE soll am ZSW in Ulm durch die Stadtwerke eine Wasserelektrolyse erstellt und betrieben werden. Den grünen Strom für die Elektrolyse liefert das Donaukraftwerk Böfinger Halde. Das Brennstoffzellentestfeld am ZSW wird damit mit klimaneutralem Wasserstoff versorgt werden. Das ZSW Stuttgart ist an „H₂ GeNeSiS“ mit dem „H₂-Marktplatz“ beteiligt. Dabei soll ein Verteilernetz mit Wasserstoff-Pipeline entlang des Neckars aufgebaut werden. Das ZSW wird mit der BW Elektrolyse an einem Elektrolyse-Standort am Hafen in diese Pipeline einspeisen. Die Projekte des EFRE-Förderprogramms laufen bis 2027.



// POWDER-UP!: CATHODE MATERIAL IN BATCHES OF UP TO 100 KILOGRAMMES

Next-generation cathode materials are not yet being manufactured in Germany on an industrial scale. It is therefore almost impossible for research institutions to put them into battery cells. The Powder-Up! project will see the ZSW in Ulm setting up a pilot plant for the production of these cathode materials for future lithium-ion batteries by the end of 2022. It will be possible to produce batches of up to 100 kilogrammes in the new Powder-Up! plant. Research partners in Germany and Europe as well as partners from industry will be able to source the cathode materials made at the ZSW for use in their pilot plants in future. This will close a gaping hole in the scientific landscape in Germany. Government official Engelbert Beyer from the Federal Ministry of Education and Research (Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF) handed over the grant notification letter confirming funding of 20 million euro on 03.11.2021.

// MODEL REGIONS FOR HY-FIVE UND GENESIS

Two projects have been selected for ERDF funding in the “Model Region Green Hydrogen” programme. The first one is “Hy-FIVE”, submitted by the city of Ulm, the district of Reutlingen and the Alb-Donau-Kreis district, and the second one is the “H₂ GeNeSiS” flagship region project which is coordinated by the Stuttgart Region Economic Development Corporation (Wirtschaftsförderung Region Stuttgart). Hy-FIVE will see the public utility company developing and operating a water electrolysis facility at the ZSW Ulm. It will therefore be possible to deliver climate-neutral hydrogen to the fuel cell test site at the ZSW. The ZSW Stuttgart is involved in the “H₂ GeNeSiS” model region project. A hydrogen pipeline along the Neckar is set to take centre stage in this undertaking. The ZSW Stuttgart will also feed into this pipeline at an electrolysis site at the port through the BW Electrolysis project. H₂ GeNeSiS is intended to demonstrate how the hydrogen economy can function in Baden-Württemberg in an economically viable, socially acceptable and ecologically worthwhile manner. Both projects will run until 2027.

// Maïke Schmidt, Fachgebiet Systemanalyse, ist von Ministerpräsident Winfried Kretschmann in den externen Klima-Sachverständigenrat berufen worden, der das Land Baden-Württemberg bei der Umsetzung der Energiewende und der bis 2040 angestrebten Klimaneutralität berät.
 // Head of the Systems Analysis department Maïke Schmidt has been appointed by Minister-President Winfried Kretschmann to the external Climate Advisory Council which advises the federal state of Baden-Württemberg on the implementation of the energy transition and on achieving the climate neutrality targets by 2040.



// WASSERSTOFF-STRATEGIE FÜR DIE REGION STUTTGART

Wie sich Stuttgart auf Wasserstoff als Energieträger der Zukunft einstellt, hat das ZSW zusammen mit Partnern in der „Wasserstoff- und Brennstoffzellenstrategie für die Region Stuttgart“ erarbeitet. Sie baut auf den Wasserstoff-Roadmaps der EU, Deutschlands und Baden-Württembergs auf und beinhaltet Vorschläge, Empfehlungen und Maßnahmen zur Transformation der Region Stuttgart in eine grüne Wasserstoffregion. Auch für Stuttgart ist eines der wichtigsten strategischen Ziele die Marktaktivierung und Industrialisierung der Wasserstoff- und Brennstoffzellenwirtschaft, um durch den Strukturwandel hin zu „grünen“ Technologien Wohlstand und Arbeitsplätze nicht nur zu wahren, sondern auszubauen. Die Strategie wurde gemeinsam mit dem ZSW-Fachgebiet Regenerative Energieträger und Verfahren sowie dem Fraunhofer IAO und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt.

// PRODUKTION VON KLIMANEUTRALEM eLNG AUS LUFT-CO₂

Mit einem Verfahren zur Herstellung von klimaneutralem eLNG aus Wasserstoff und Luft ist den Wissenschaftlern ein Forschungserfolg gelungen, der die Klimaneutralität vorantreibt. Der Systemdemonstrator im Labor in Stuttgart erzeugt mittels Elektrizität aus erneuerbaren Energien synthetisches flüssiges Methan aus Wasserstoff und Luft – sogenanntes eLNG. Im Gegensatz zu LNG (Liquefied Natural Gas), das auf fossile Erdgas basiert, wird bei synthetischem strombasiertem eLNG (electrified LNG) der Energieträger klimaneutral hergestellt. Das flüssige Gas wird aus grünem Wasserstoff und Kohlendioxid aus der Umgebungsluft gewonnen. Die Forschungen an dem vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekt begannen im Jahr 2020 und wurden mit der Demonstration der Gesamtprozesskette im Maßstab 1 kg/h eLNG erfolgreich abgeschlossen. Die Technologie kann nun in den großtechnischen Maßstab überführt werden.

HYDROGEN STRATEGY FOR THE STUTTGART REGION

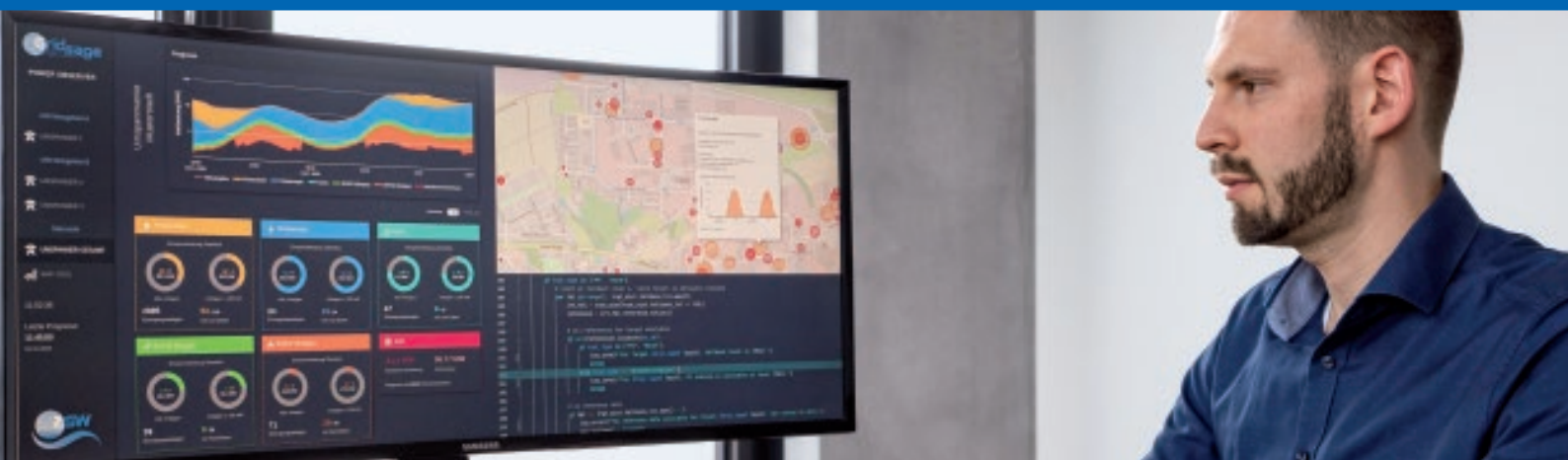
The ZSW joined forces with partners working on the “hydrogen and fuel cell strategy for the Stuttgart region” to examine the ways in which Stuttgart is preparing for hydrogen as an energy source of the future. Its strategy is based on the hydrogen road maps set out by the EU, Germany and Baden-Württemberg, and it includes proposals, recommendations and measures conducive to transforming the Stuttgart area into a green hydrogen region. There are strategic goals for Stuttgart as well, one of the most important being the activation and commercialisation of the hydrogen and fuel cell market with a view not only to maintaining, but also to developing greater prosperity and jobs through the structural change towards “green” technologies. The strategy was formulated in joint research with the ZSW department of Renewable Fuels and Processes and with the Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO and the German Aerospace Center.

// PRODUCTION OF CLIMATE-NEUTRAL eLNG FROM CO₂ IN THE AIR

The research scientists have successfully applied a process for the production of eco-friendly eLNG from hydrogen and air which also plays a role in advancing climate neutrality. The demonstration system in the laboratory in Stuttgart uses electricity from renewable sources of energy to generate synthetic liquid methane from hydrogen and air, known by the name of eLNG. In contrast to LNG (liquefied natural gas), which is based on fossil gas, the energy carrier is produced in a climate-neutral manner with synthetic all-electric LNG (electrified LNG). The liquid gas is obtained from green hydrogen and carbon dioxide from the ambient air. Research on the project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs began 1.5 years ago and has now been successfully completed with the demonstration of the entire process chain on a scale of 1 kg eLNG per hour. The technology can now be rolled out on an industrial scale.



// Die Anlage zur Herstellung von eLNG.
// The system for the production of eLNG.



// GRIDSAGE: PROGNOSEN FÜR STADTWERKE IM RAHMEN VON REDISPATCH 2.0

Im Berichtsjahr wurde das ZSW-Softwareprodukt GridSage fertiggestellt. Im Netz vieler Stadtwerke von Nord- bis Süddeutschland liefert es im Rahmen von Redispatch 2.0 bereits jetzt die Prognose der Erzeugungsleistung Hunderter Anlagen (Photovoltaik, Wind, Wasserkraft und Blockheizkraftwerke). Einige Stadtwerke, die zeitweise Netzengpässe erwarten, nutzen das zusätzlich angebotene Leistungsmerkmal von GridSage, um eine vollständige Lastflussprognose für alle Knotenpunkte im Mittelspannungsnetz und an den Koppelpunkten zum überlagerten Netz zu erhalten. Mit GridSage erhalten die Stadtwerke Transparenz für die zu erwartenden Netzzustände für die nächsten 36 Stunden. Die Netze werden so effizienter ausgelastet und vorhandene Flexibilität werden bei Bedarf zielgenau zur Netzentlastung genutzt.

// HOHE EFFIZIENZ FÜR PEROWSKIT-SOLARZELLEN

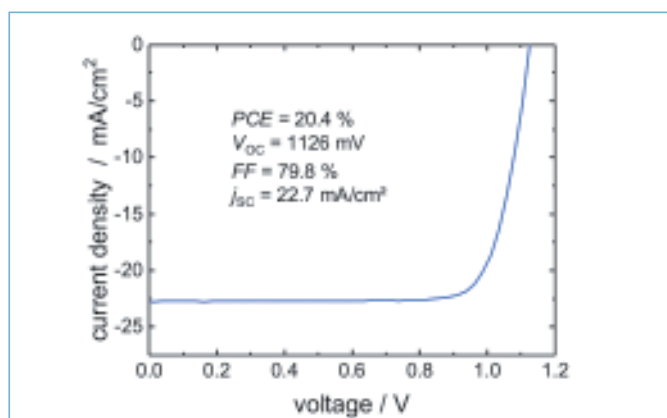
Dem ZSW ist es gelungen, Perowskit-Solarzellen mit einem hohen Wirkungsgrad von mehr als 20 % herzustellen. Durch optimierte Beschichtungsverfahren und die Nutzung von Passivierungsschichten auf der Oberfläche des aktiven Films konnten störende Rekombinationsverluste reduziert werden. Für die Anwendung in sogenannten Tandemsolarzellen, die das Sonnenspektrum durch die Kombination von zwei Solarzellen mit unterschiedlichen Absorptionsbereichen besonders gut ausnutzen, wurde die Bandlücke des Perowskits angepasst und der metallische Rückkontakt durch eine transparente Elektrode ersetzt. Auf diese Weise wurden semitransparente Zellen mit 18 % Effizienz erzielt, die nahezu 90 % des infraroten Lichts durchlassen, das dann in der zweiten Zelle des Tandemverbands genutzt werden kann. Im Tandem mit einer hocheffizienten CIGS-Zelle wurde auf diese Weise eine Gesamteffizienz von 25 % erreicht.

// GRIDSAGE: FORECASTS FOR PUBLIC UTILITIES IN REDISPATCH 2.0

GridSage was completed in the year under review. This product currently provides forecasts in an operational context, estimating the generating capacity of hundreds of systems (photovoltaic, wind, hydroelectric power, and combined heat and power plants) which can be controlled in many public utility grids throughout the length and breadth of Germany under the Redispatch 2.0 grid management scheme. Some public utilities, which expect occasional bottlenecks in the grid, use the additional feature offered by GridSage to obtain a full flow forecast of the load at all the points of intersection in the medium-voltage power grid and at the crossover points to the higher-level grid. The public utilities get transparency with GridSage, having access to the grid status data expected for the next 36 hours. The grid capacity is therefore used more efficiently, and full advantage can be taken of any existing flexibility where identified in order to ease strain on the grid if necessary.

// HIGH EFFICIENCY LEVELS FOR PEROVSKITE SOLAR CELLS

The ZSW has succeeded in producing perovskite solar cells boasting an efficiency of more than 20 %. The research centre managed to reduce problematic recombination losses through improved coating processes and the use of passivation layers on the surface of the active film. The perovskite band gap was adjusted and the rear metal contact was replaced by a transparent electrode in preparation for use in so-called multi-junction solar cells which take great advantage of the solar spectrum by combining two solar cells with different absorption ranges. This produced semi-transparent cells with 18 % efficiency which let through almost 90 % of the infrared light which can then be used in the second cell of the tandem stack. In tandem with a highly efficient CIGS cell, an overall efficiency of 25 % was achieved in this way.

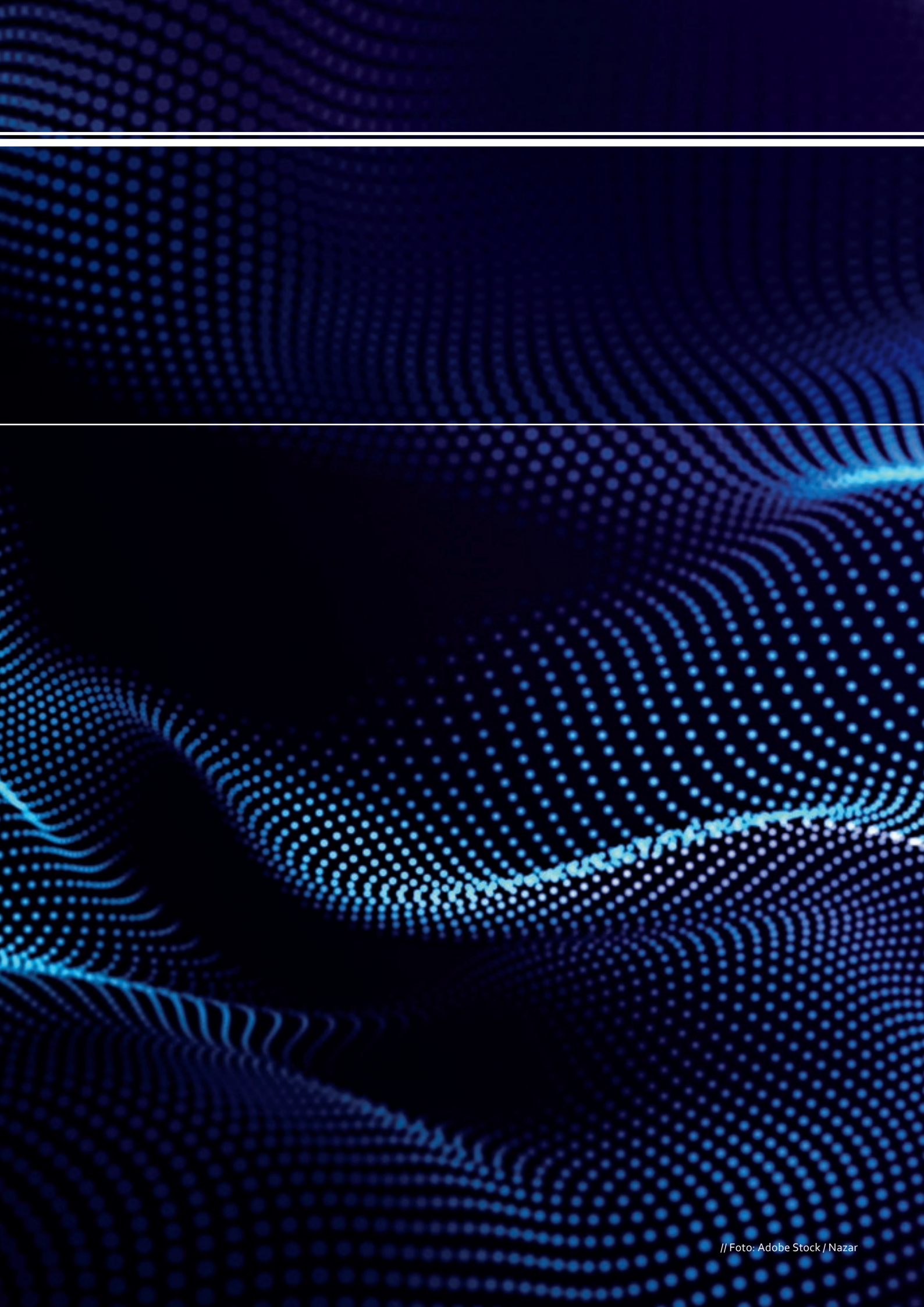


// Stromdichte-Spannungs-Kennlinie einer ZSW-Perowskit-Solarzelle mit einer aktiven Fläche von 0,5 cm² und einem Wirkungsgrad von 20,4 %.

// Current density-voltage graph for a ZSW perovskite solar cell with an active area of 0.5 cm² and an efficiency of 20.4 %.



// Schwerpunktbericht // Focus Report



// 20 Jahre KI am ZSW: Pionierarbeit mit Wirkung

// 20 years of AI at the ZSW:
pioneering work with impact



// The AI team at the ZSW: Moritz Parth, Daniel Leukauf, Martin Felder, Nico Klar, Katharina Strecker, Kay Ohnmeiß, Marcel Zoll, Frank Sehnke und Anton Kaifel (from left to right). Not on the photograph: Linda Menger und Ursula Amann.

WIE ALLES BEGANN

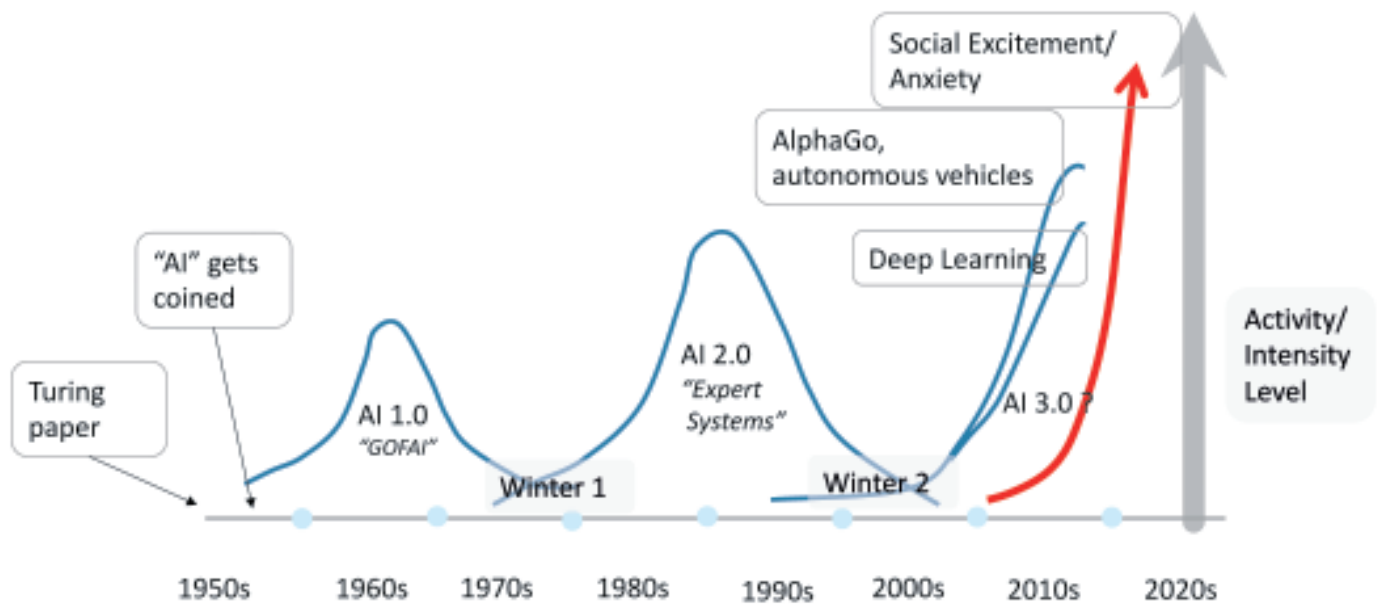
Künstliche Intelligenz (KI) war schon immer ein Thema, das die Fantasie der Menschen beflügelte. Im Jahr 1970 erklärte Marvin Minsky, der „Vater der KI“, dass in wenigen Jahren Maschinen Shakespeare lesen würden. Mit seiner Prognose lag er nicht ganz falsch. Künstliche Intelligenz hat längst alle Bereiche erobert: Selbstlernende Maschinen komponieren, malen, schreiben Gedichte, erkunden das Universum und entschlüsseln die menschliche DNA. Nicht nur für Musikfans war die Schlagzeile eine Überraschung: Ludwig van Beethovens 10. Sinfonie – die „Unvollendete“ – wurde fast 200 Jahre nach dem Tod des großen deutschen Komponisten und Pianisten vollendet und zur Uraufführung gebracht. Zu Ende komponiert wurde das Werk mittels Künstlicher Intelligenz.

HOW IT ALL BEGAN

Artificial intelligence (AI) has always been a subject which has captured the human imagination. Marvin Minsky, the “father of AI”, said that machines would be reading Shakespeare in a few years. That was in 1970. He was not entirely wrong in his prediction. Artificial intelligence has long since penetrated all aspects of life, with self-learning machines composing, painting, writing poetry, exploring the universe and decoding human DNA. The headline came as a surprise – and not just for music fans: Ludwig van Beethoven’s 10th symphony – the “Unfinished” – had been completed and performed for the first time almost 200 years after the death of the great German composer and pianist. The composition had been finished using artificial intelligence.

// Historie der KI-Entwicklung in den letzten Jahrzehnten. 1989 hat das ZSW begonnen, neuronale Netz-Modelle in der Meteorologie- und Atmosphärenforschung zu entwickeln und anzuwenden.

// History of the development of AI in recent decades. The ZSW began to develop and apply neural network models in meteorological and atmospheric research back in 1989.



Im Sommer sorgte eine Nachricht aus der Medizin für Aufsehen: Der Grundbaustein des Lebens wurde entschlüsselt. Britischen Forschern und Forscherinnen ist es mithilfe von Künstlicher Intelligenz gelungen, die Faltung von Proteinen präzise vorherzusagen und damit, wie Leben funktioniert. Eine frei zugängliche Datenbank, die viele Tausend Proteinstrukturen enthält, soll für Durchbrüche in der medizinischen Forschung genutzt werden, aber auch für die Pflanzenzucht – oder für die Entwicklung von Bakterien, die Plastik in der Umwelt zersetzen können. Die Reihe der Erfolgsmeldungen über die kreative Anwendung von Künstlicher Intelligenz lässt sich beliebig fortsetzen. Vieles, an das wir früher kaum zu denken wagten, ist heute mit KI möglich.

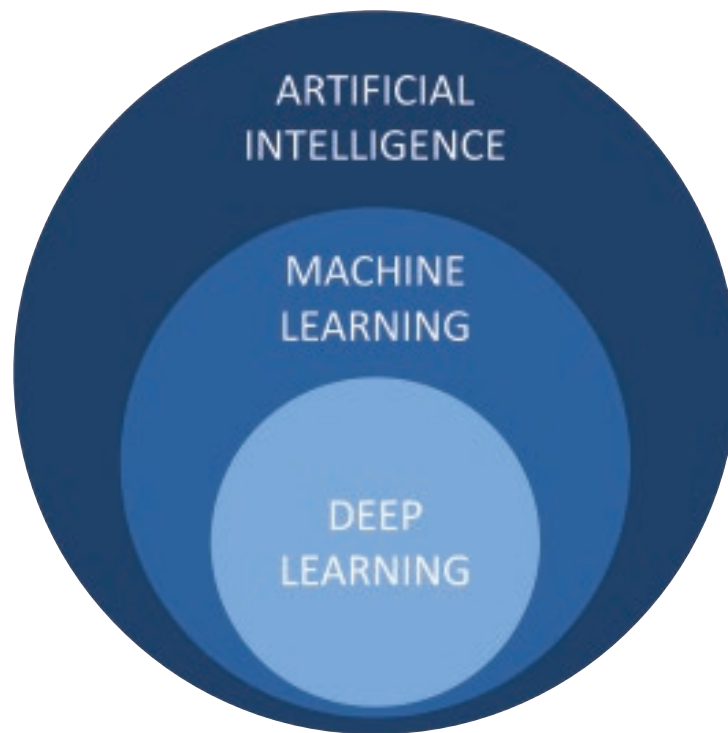
Medical research news caused a stir in the summer, with reports claiming that the basic building block of life had been decoded. With the help of artificial intelligence, British research scientists have managed to arrive at precise predictions of the folding of proteins and therewith the mechanics of life. There are plans to use a freely accessible database containing many thousands of protein structures for breakthroughs in medical research but also for the cultivation of plants – or for the development of bacteria which can degrade plastic in the environment. There is an inexhaustible supply of success stories about the creative application of artificial intelligence, and it emerges very clearly that many things which we hardly dared think of in former times are now possible with AI.



// Foto: Adobe Stock / monsitj

Künstliche Intelligenz ist seit den 50er-Jahren ein Forschungsthema, beginnend mit der symbolischen KI, der sogenannten „Good Old-Fashioned Artificial Intelligence“ (GOFAI). Zu dieser Zeit waren Computer jedoch noch nicht in der Lage, mit KI reale Probleme zu lösen. Erst im Zuge der Entwicklung von günstigen und schnellen Computern sowie dem Zugang zu großen Datenmengen mit Beginn des 21. Jahrhunderts erfolgte der eigentliche Durchbruch für die KI. Lange bevor der große Hype um die KI einsetzte, forschte das ZSW schon an der Entwicklung von intelligenten Lösungen für die Anwendung von erneuerbaren Energien. Damit war das ZSW ein Pionier in diesem zentralen Zukunftsfeld und Innovator für KI-Anwendungen im Bereich erneuerbare Energien, Meteorologie und Atmosphärenphysik.

Artificial intelligence has been a research subject since the 1950s, starting with symbolic AI, also known as “Good Old-Fashioned Artificial Intelligence” (GOFAI). At that time, however, computers were not yet capable of solving real-world problems with AI. Only with the development of affordable and fast computers and access to large amounts of data at the beginning of the 21st century did the real breakthrough for AI take place. Long before there was a big hype about AI, the ZSW was already researching the development of intelligent solutions for the use of renewable sources of energy. This made the ZSW a pioneer in this field of key significance for the future and a driver of innovation in renewable energy, meteorology and atmospheric physics.



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ – DEFINITION

DEFINITION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

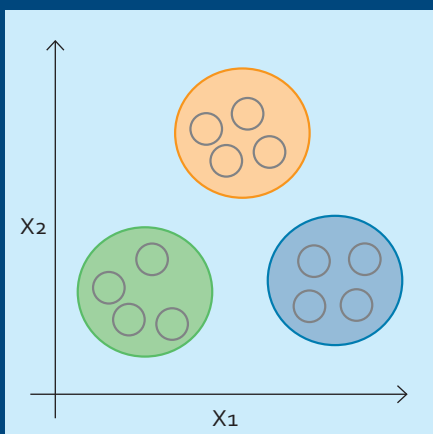
Künstliche Intelligenz oder Artificial Intelligence ist ein Überbegriff und beschreibt den Ansatz, mit dem Maschinen intelligentes menschliches Verhalten auf der Basis von Daten erlernen, um Aufgaben zu lösen, die mit klassischen Methoden nicht lösbar sind. Machine Learning wiederum ist eine Technologie und ein Teilgebiet der Artificial Intelligence. Dazu werden Daten (Bilder, Videos, Audiodateien oder Messdatenzeitreihen) in ein Programm eingespeist, das mithilfe von Algorithmen die Daten analysiert, darin Muster erkennt und so präzise Vorhersagen ermöglicht und Entscheidungen treffen kann. Die Besonderheit ist, dass Machine-Learning-Programme in der Lage sind, ohne weiteren menschlichen Eingriff aus Daten komplexe und nichtlineare Zusammenhänge zu erkennen. Der dritte Begriff in diesem Themenfeld ist Deep Learning. Dabei handelt es sich um eine spezielle Methode der Informationsverarbeitung. Als technische Grundlage des Deep Learnings dienen künstliche neuronale Netze, die während des Lernvorgangs immer wieder neu verknüpft werden. Die Funktionsweise ist vom Lernen im menschlichen Gehirn inspiriert. Auf Basis vorhandener Informationen und des neuronalen Netzes kann das System das Erlernte immer wieder mit neuen Inhalten verknüpfen und dadurch erneut lernen. Entscheidungen werden bestätigt oder in einem neuen Anlauf geändert. Deep Learning eignet sich für alle Anwendungen, bei denen große Datenbestände zur Verfügung stehen, aus denen sich Muster und

Artificial intelligence is an umbrella term referring to the use of machines to learn intelligent human behaviour on the basis of data in order to solve problems which cannot be solved using classic methods. Machine learning is, in turn, a technology and branch of artificial intelligence. This involves feeding data (images, videos, audio files or measurement time series data) into a program which uses algorithms to analyse the data and recognise patterns in the data, thereby enabling precise predictions and decisions to be made. The point of note is that machine learning programs are able to identify complex and non-linear relationships from data without further human intervention. The third term in this section is deep learning. This is a special method of data processing. Deep learning is based on artificial neural networks which are constantly forming new connections as they learn. The way it works is inspired by the process of learning in the human brain. On the basis of existing information and neural networks, the system can keep linking what it has learned with new content, allowing it to learn more. Decisions will be confirmed or changed as the process is repeated. Deep learning is suitable for all applications where large amounts of data are available as a source of patterns and models. There are basically three different approaches in the field of machine learning. There is unsupervised learning which is used to recognise patterns in large amounts of data automatically and to cluster the data according

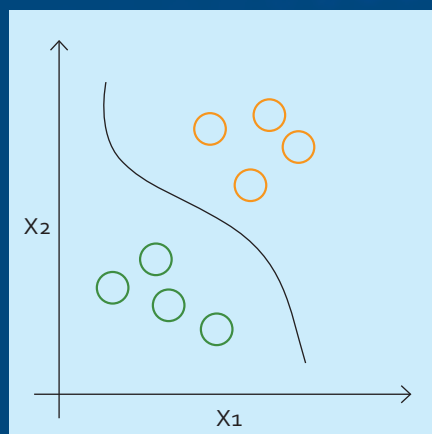
Modelle ableiten lassen. Im Bereich des maschinellen Lernens gibt es grundsätzlich drei unterschiedliche Ansätze: Das unüberwachte Lernen dient dazu, in großen Datenmengen automatisch Muster zu erkennen und die Daten entsprechend zu clustern. Beim überwachten Lernen wird ein Modell trainiert, das den Zusammenhang zwischen den Eingangsdaten und den Zieldaten beschreibt. Dies kann auch komplexer Natur sein. Das sogenannte Verstärkungslernen wird meist für Optimierungsaufgaben eingesetzt. In diesem Fall versucht ein Modell, das Verhalten eines Systems anhand von Beispielen zu erlernen und zu optimieren. Nach jedem Modelllauf wird das Ergebnis mit dem realen Verhalten des Systems verglichen und aus der Differenz ein positiver oder negativer Belohnungsterm (Reward) abgeleitet. Mit dem Reward wird das Modell dann aktualisiert und gleichzeitig werden neue Beispiele präsentiert.

gly. Then there is supervised learning in which a model is trained which characterises the relationship between the input data and the target data. This can also be of a complex nature. The approach called reinforcement learning is mostly used for optimisation purposes. This is where a model tries to learn and optimise the actions of a system on the basis of examples. After each model run, the result is compared with the real behaviour of the system and a positive or negative reward is derived from the difference. The model is then updated with this reward and new examples are presented.

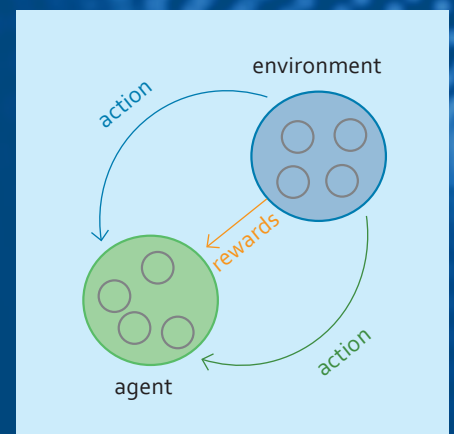
UNSUPERVISED



SUPERVISED

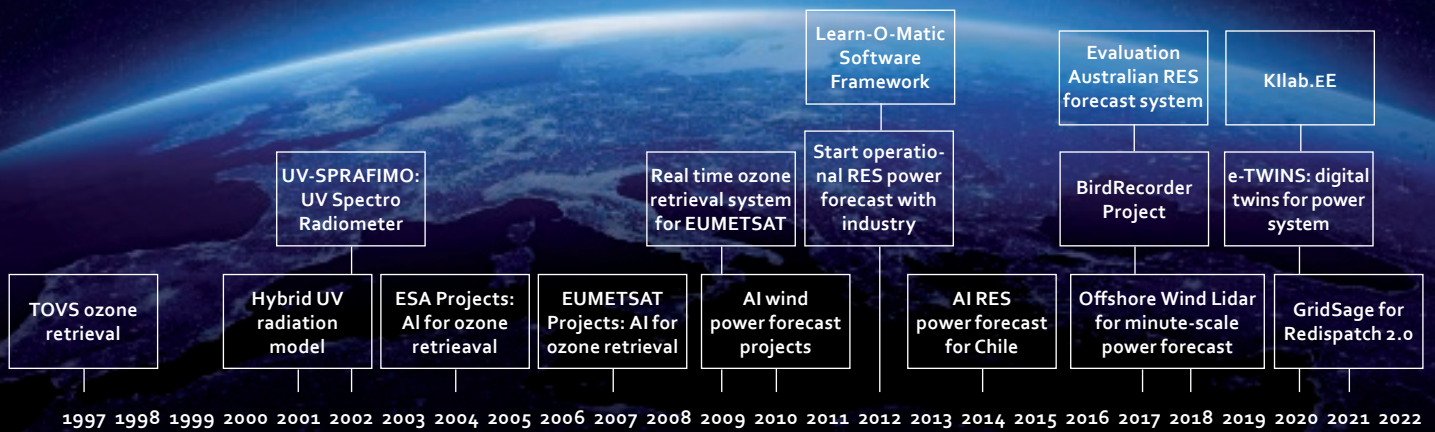


REINFORCEMENT



// Focus Report

// Foto: Adobe Stock / Lev



KI ALS SCHLÜSSEL FÜR INNOVATION

AI AS THE KEY TO INNOVATION

Künstliche Intelligenz vereinfacht Arbeitsabläufe, ermöglicht präzisere Prognosen und schafft neue Geschäftsmodelle. Sie erlaubt schnellere Entscheidungen aufgrund einer besseren Analyse von Daten und erhöht die Anpassungsfähigkeit von Unternehmen an Marktveränderungen durch Echtzeitinformationen sowie Vorhersagen jenseits menschlicher Fähigkeiten. KI schafft für Unternehmen also weit mehr als Effizienz – sie ist ein Schlüssel zu erhöhter Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft.

Da sich die KI-Technologie rasant entwickelt, war es für die Forschung am ZSW wichtig, schnell von der Experimentierphase zur Implementierung überzugehen. Seit mehr als 20 Jahren wird KI am ZSW eingesetzt, um die Energiewende voranzubringen. Zuerst standen Anwendungen in den Bereichen der Meteorologie und Atmosphärenphysik im Vordergrund. In den Jahren 2006 bis 2010 hat das ZSW mehrere internationale Projekte für die European Space Agency (ESA) und die Europäische Organisation für die Nutzung von meteorologischen Daten (EUMETSAT) geleitet, um mit Methoden des maschinellen Lernens unter anderem neue Einblicke in die Veränderung der Ozonschicht zu bekommen. Im Rahmen von nationalen Projekten wurden anschließend Methoden für Einspeiseprognosen von erneuerbaren Energien entwickelt und zusammen mit der Industrie in die kommerzielle Anwendung überführt. Parallel werden bis heute vielfältige Forschungs- und Industrieprojekte betreut, um beispielsweise Einspeiseprognosen für erneuerbare Energien auf ein neues Gütelevel zu heben. In den vergangenen Jahren hat sich das Anwendungsfeld erweitert und die Anzahl der Projekte wesentlich erhöht. Unsere Forschungen erstrecken sich auf drei Bereiche: Netzintegration, erneuerbare Energien und Energiesystem, Produktionsforschung und Prozessoptimierung sowie Qualitätssicherung und Betriebssicherheit.

Die Einsatzbereiche sind vielseitig: Angefangen bei der Modellierung und Optimierung von Fertigungsprozessen für Batterien, CIGS-Dünnschichtsolarzellen und Brennstoffzellen über die Auswertung von Satellitendaten für die Erhebung von Photovoltaik-Potenzialen bis zum Monitoring von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen. Die nächste Stufe ist die Entwicklung von selbstlernenden digitalen Zwillingen für ein zukünftiges Energiesystem.

Artificial intelligence simplifies working processes, enables greater precision in forecasting, and creates new business models. It allows decisions to be made more quickly based on better analysis of data, increases the ability of companies to adapt to market changes through real-time information, and enables predictions beyond human capabilities. So AI offers companies far more than efficiency – it is the key to increased competitiveness and innovative strength.

AI technology is developing rapidly therefore it was important for the research at the ZSW to move quickly from the experimental phase to the implementation stage. AI has been used at the ZSW for more than 20 years to advance the energy transition. The focus initially was on applications in meteorology and atmospheric physics. The ZSW collaborated in several international projects for the European Space Agency (ESA) and the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) from 2006 to 2010 with a view to using machine learning methods to gain new insights into various subjects, such as the change in the ozone layer. Methods for power forecasts for renewable energy sources were then developed in national projects and deployed in commercial applications in collaboration with industry. Many different research projects and industrial ventures are being supervised to this day. An example target of these parallel undertakings is to raise power forecasts for renewable energies to a new quality level. In recent years, the field of application has expanded and the number of projects has increased significantly. Our research work covers three areas: grid integration, renewable sources of energy and energy systems; production research and process optimisation; quality assurance and operational safety.

There is a wide range of potential applications, starting with the modelling and optimisation of manufacturing processes for batteries, CIGS thin-film solar cells and fuel cells, and moving to the processing of satellite data for the investigation of photovoltaic potential right through to the monitoring of wind energy and photovoltaic systems. The next stage is the development of self-learning digital twins for a future energy system.

// Focus Report



// Foto: Adobe Stock / conceptcafe

NETZINTEGRATION UND ENERGIESYSTEM

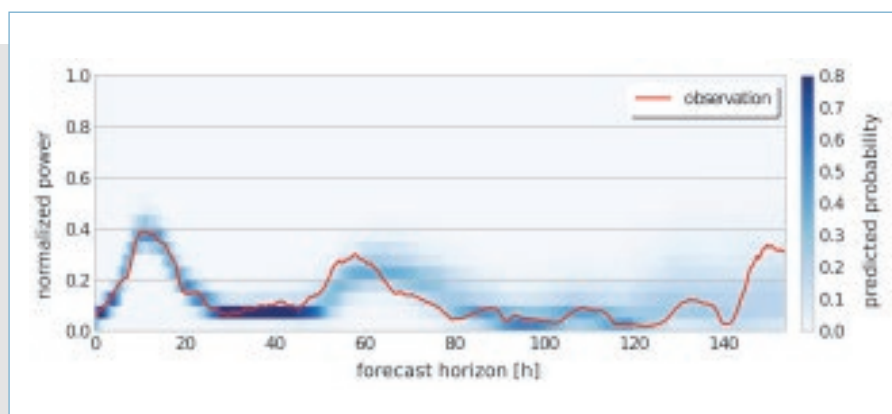
POWER GRID INTEGRATION AND ENERGY SYSTEM

WETTERDATEN SINNVOLL NUTZEN

Der Klimaschutz erfordert eine schnellstmögliche Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien. Da die Stromerzeugung aus Windenergie und solarer Einstrahlung vom Wetter abhängig ist, bedarf es möglichst präziser Erzeugungsprognosen, um Angebot und Nachfrage in der Energieversorgung jederzeit in der Balance halten zu können. Das kann nur mit KI geleistet werden, die mit numerischen Wettermodellen Vorhersagen für Zeiträume bis zu zwei Wochen treffen kann. Eine Wettervorhersage ist aber noch keine Einspeisevorhersage für Solar- und Windenergieanlagen. Hier kommen KI-Methoden ins Spiel: Sie werden eingesetzt, um mithilfe von numerischen Wettermodellen die Wind- oder Photovoltaik-Leistung in unterschiedlichen Aggregationsstufen zu prognostizieren. Diese reichen von Einzelanlagen über Regionen bis zu ganzen Ländern. Zusätzlich können sie Informationen aus früheren Erträgen sowie Echtzeit-Messwerte relevanter Einflussparameter berücksichtigen. Von meteorologischen Sensoren über Wind-Lidar-Messungen bis hin zu Wolkenkameras kann die KI alle relevanten Informationsquellen einbeziehen. So können Prognosen mit KI die Eintrittswahrscheinlichkeit von Wetterverläufen vorhersagen und damit die Reserveleistung im Stromnetz optimieren. Das ZSW ist an diesen Entwicklungen mit verschiedenen Projekten beteiligt, sei es durch eigene Wettermodellläufe und Prognosen für das WindForS-Windtestfeld, die Integration von Lidar-Messungen in Offshore-Windparks oder Photovoltaik-Prognosen für den Redispatch 2.0 (Regelungen zum Umgang mit Engpässen im Stromnetz).

WISE USE OF WEATHER DATA

When it comes to the protection of the environment, the fastest possible action is required to change over to renewable sources in our energy supply. The generation of electricity from wind energy and solar radiation depends on the weather, therefore there is a need for maximum precision in generation forecasts in order to be able to keep energy supply and demand in balance at all times. This can only be achieved with AI which has the ability to make forecasts for periods of up to two weeks using numerical weather prediction models. It must be said, however, that a weather forecast is not a power forecast for solar and wind power systems. This is where AI methods come into play, using weather prediction models to forecast wind power or photovoltaic power at different aggregation levels. They range from individual systems and regions right through to whole countries. They can also take account of previous yield data and real-time measurements of relevant influencing factors. From meteorological sensors and lidar wind measurements right through to all-sky cameras, AI can include all the relevant sources of information. Forecasts with AI can therefore predict the probability of the occurrence of weather patterns, for example, thereby optimising the reserve power in the grid. The ZSW is following these developments in its involvement in various projects, whether by running its own weather forecast models for the WindForS wind test site, integrating lidar measurements at offshore wind farms, or supplying photovoltaic power forecasts for the Redispatch 2.0 scheme (policy aimed at the management of bottlenecks in the power grid).



// Vorhersage der Windleistung eines größeren Gebietes mit Prognoseunsicherheit (blaue Schattierung).

// Wind power forecast for a relatively large area with problems of uncertainty (blue shading).



Redispatch 2.0

// Foto: Adobe Stock / gopixa

HOHE TRANSPARENZ IM NETZ MIT REDISPATCH 2.0

Das am ZSW entwickelte System GridSage kann mithilfe von KI die Versorgungssicherheit im Stromnetz erhöhen. Seit Oktober 2021 ist die Kraftwerkseinsatzplanung in Deutschland gesetzlich neu geregelt. Mit dem Redispatch 2.0 fallen nicht mehr nur Großkraftwerke unter das Engpassmanagement, sondern auch Photovoltaik- und Windenergieanlagen, Laufwasserkraftwerke sowie Blockheizkraftwerke mit installierten Leistungen größer 100 Kilowatt/Stunde. Dies stellt Verteilnetzbetreiber, die auf Mittel- und Niederspannungsebene für die Versorgungssicherheit im Stromnetz verantwortlich sind, vor neue Herausforderungen. Sie müssen nun Leistungsprognosen für alle Erzeugungsanlagen, die größer als 100 Kilowatt sind, in ihrem Netz liefern. Dabei hilft GridSage.

KI-Modelle lernen dabei aus vorhandenen Daten, wie viel Leistung eine Anlage bei welchen Wetterbedingungen erzeugt. Anhand dieser Daten liefert GridSage operative Prognosen für alle relevanten Erzeugungsanlagen für die nächsten 36 Stunden. Die hochauflösenden Prognosen werden den Netzbetreibern on demand zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig generiert GridSage weitere Prognosen, die den Energieverbrauch von Großkunden, die Photovoltaik-Überschusseinspeisung von Prosumern oder den Energiefluss an Kopplungspunkten zu den überlagerten Netzen abbilden. Verteilnetzbetreiber erhalten so mithilfe von Künstlicher Intelligenz einen umfangreichen Einblick in ihre Netze. Durch das hohe Maß an Transparenz können diese effizienter ausgelastet und der Netzausbau optimiert werden. Digitalisierung und KI ermöglichen somit eine kosteneffektive Beschleunigung der Energiewende.

HIGH TRANSPARENCY WITH REDISPATCH 2.0

The GridSage system developed at the ZSW can guarantee the power supply in the grid with the help of AI. New laws have been in force in Germany since October 2021 on power plant scheduling. Under Redispatch 2.0 the congestion management no longer applies solely to large power plants but also to photovoltaic systems, wind turbines, run-of-river power plants and cogeneration power plants with installed capacities of more than 100 kilowatts per hour. This poses new challenges for distribution network operators who are responsible for the security of supply in the power grid at medium-voltage and low-voltage level. They now have to deliver power forecasts for all generating units in their grid exceeding 100 kilowatts. GridSage helps with this requirement.

AI models learn from existing data how much power a system will generate in any given weather conditions. Using this data, GridSage provides operational forecasts for all the relevant generating units for the next 36 hours. The high-resolution forecasts are made available to the grid operators on demand. At the same time, GridSage generates further forecasts which plot the energy consumption of major customers, the surplus photovoltaic output fed in by prosumers, or the energy flow at coupling points to the higher-level grids. The use of artificial intelligence provides distribution system operators with great insight into their networks. The high degree of transparency allows greater efficiency in the utilisation of capacity and optimisation of network expansion. Digitisation and AI are therefore enabling a cost-effective acceleration of the energy transition.



// Foto: Adobe Stock / monsitj

ZWILLINGSTECHNOLOGIE FÜR DAS ENERGIESYSTEM

Mit der steigenden Zahl von Erneuerbare-Energie-Systemen, aber auch von batterieelektrischen Fahrzeugen und Wärmepumpen wächst der Koordinierungsaufwand im Energiesystem stetig. Durch die Digitalisierung lassen sich Daten zwar immer günstiger und effizienter erfassen und übermitteln, doch die riesigen Datenmengen führen auch zu einer Datenflut. Der Einsatz von digitalen Zwillingen (DZ) hilft, die Datenflut zu strukturieren, zu vereinheitlichen und gleichzeitig das volle Potenzial für neue digitale Anwendungen auszuschöpfen. Dabei simuliert der digitale Zwilling eines technischen Gerätes seinen realen Partner quasi in Echtzeit und erlaubt damit Einblicke in dessen Zustand.

Das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt e-TWINS hat sich zum Ziel gesetzt, das elektrische Energiesystem der Zukunft als zelluläres, hierarchisches System von selbstlernenden digitalen Zwillingen abzubilden. Ein digitaler Zwilling kann mehrere Wind- oder Photovoltaik-Anlagen gleichzeitig spiegeln. Die DZ sind dabei über eine gemeinsame Softwareplattform miteinander verbunden, sodass sie Daten gegenseitig austauschen können. Sie verwenden aktuelle Messdaten, um externe Systembedingungen und interne Systemzustände zu erfassen. So werden mit KI-Methoden Vorhersagen verbessert, langfristige Veränderungen abgebildet und Abweichungen bei der Modellierung korrigiert. Das ZSW entwickelt dabei Datenzwillinge von Photovoltaik-Anlagen und Batteriesystemen sowie Methoden zur optimalen Bewirtschaftung von Erneuerbare-Energie-Systemen. Die Partner in dem Verbundprojekt steuern DZ von Windkraftanlagen und deren Teilkomponenten bei.

TWIN TECHNOLOGY FOR THE ENERGY SYSTEM

With the increasing number of renewable energy systems and rising sales of battery electric vehicles and heat pumps, the amount of coordination needed in the energy system is constantly growing. Digitisation does mean that data can be recorded and transmitted more and more cheaply and efficiently but the huge amounts of data also lead to a situation of overload. The use of digital twins is a helpful way of structuring and harmonising the flood of data and at the same time exploiting the full potential for new digital applications. The digital twin of a technical device simulates its real partner in real time, as it were, thereby allowing insights into its status.

Funded by the Federal Ministry for Economic Affairs, the e-TWINS project has set itself the goal of mapping the electrical energy system of the future as a cellular, hierarchical system of self-learning digital twins. A digital twin can mirror several wind turbines or photovoltaic systems at the same time. The digital twins are connected to each other through a shared software platform, allowing them to exchange data with each other. They use current measurement data to record external system conditions and internal system status data. This approach and the use of AI methods will allow predictions to be improved, long-term changes to be mapped, and anomalies in the modelling to be corrected. The ZSW is developing digital twins of photovoltaic systems and battery systems as well as methods for the optimum management of renewable energy systems. The partners in the joint project contribute digital twins of wind turbines and their components.



PRODUKTIONSFORSCHUNG UND PROZESSOPTIMIERUNG

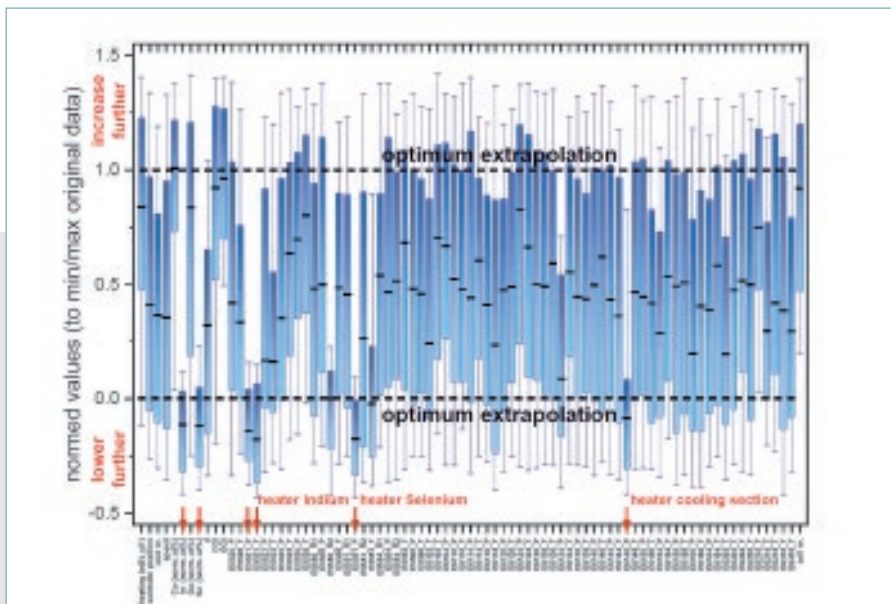
PRODUCTION RESEARCH AND PROCESS OPTIMISATION

KI FÜR DIE FERTIGUNGSOPTIMIERUNG VON SOLARZELLEN

Mit KI lassen sich auch Fertigungsprozesse für Dünnschichtsolarmodule, Batterien und Brennstoffzellen verbessern. So beispielsweise bei der Produktion von CIGS-Zellen (Solarzellen mit Absorbern aus dem Werkstoff Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid), die mithilfe von thermischer Koverdampfung der Bestandteile im Hochvakuum hergestellt werden. Dabei ist es wichtig, dass die verschiedenen Bestandteile im richtigen Mischungsverhältnis in der Schicht eingebaut werden, denn die Zusammensetzung der Schicht beeinflusst maßgeblich den Wirkungsgrad. Mit den am ZSW entwickelten KI-Methoden werden verschiedene Parameter wie Photostrom, Leerlaufspannung, Füllfaktor und Wirkungsgrad analysiert. Die KI-Modelle bewerten die Wichtigkeit der Parameter in Bezug auf den Wirkungsgrad der Solarzellen. Sie liefern unter anderem wichtige Vorschläge zur Reduzierung der Indium- und Selen-Mengen in den Schichten der Solarzellen, zur Anpassung der Heizleistung der entsprechenden Quellen sowie der Abkühlstrecke. Die von der KI vorgeschlagenen Änderungen führten zu einer besseren Zusammensetzung der aktiven Schichten und damit zu einem höheren Wirkungsgrad der CIGS-Solarzellen.

AI FOR THE OPTIMISATION OF SOLAR CELL PRODUCTION

Manufacturing processes for photovoltaic thin-film modules, batteries and fuel cells can also be improved with AI. One example is the manufacture of CIGS cells (solar cells with absorbers made of copper indium gallium selenide) which are produced by means of thermal co-evaporation of the components in a high vacuum. It is important that the various components are incorporated in the layer in the correct ratio because the composition of the layer has a significant bearing on the degree of efficiency. The AI methods developed at the ZSW are used to analyse various parameters, such as photocurrent, open-circuit voltage, fill factor and efficiency. The AI models assess the importance of the parameters in relation to the efficiency of the solar cells. They play an important role in various ways, suggesting how the amounts of indium and selenium in the layers of the solar cells might be reduced, for example, and how the heating of the relevant sources and of the cooling section might be adjusted. The changes proposed by the AI system led to a better composition of the active layers and therefore to a greater efficiency of the CIGS solar cells.



// KI-basierte Optimierung der Prozesse für die Herstellung von CIGS-Dünnschichtsolarmodulen. Die KI macht Vorschläge für die Parameteranpassungen, um den Wirkungsgrad zu steigern.
// AI-based optimisation of production processes for CIGS thin-film solar cells. The AI suggests changes to the parameters which will increase the efficiency.

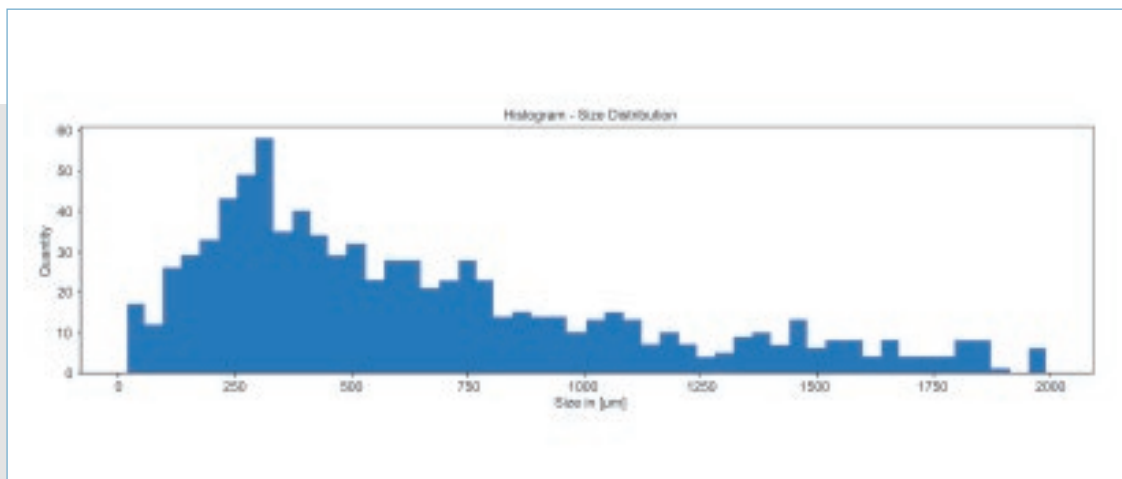


KI UND BATTERIEZELLFERTIGUNG

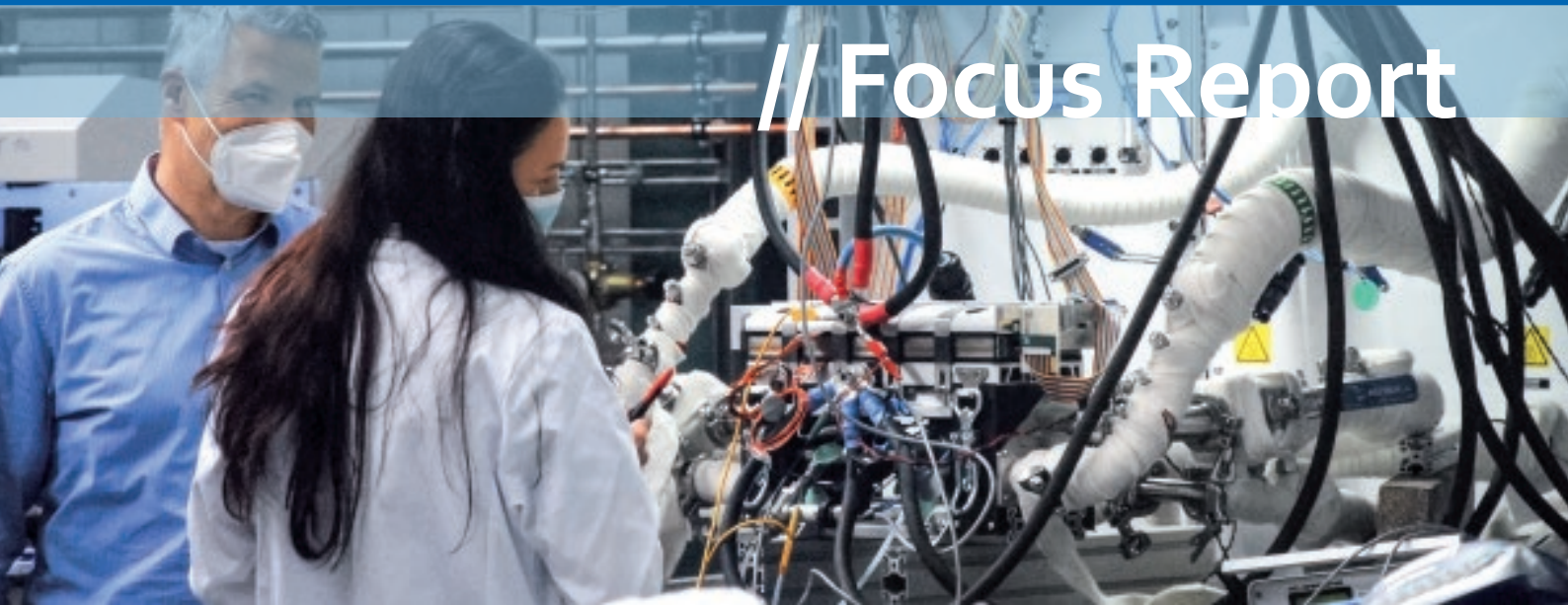
Im Themenfeld Batterien bringt das ZSW seine langjährige KI-Expertise im Projekt „KontEIPro“, lösungsmittelfreie Elektrodenherstellung mit intelligenter Qualitätssicherung und Prozessüberwachung gekoppelt mit KI“ (KontEIPro) des Forschungsclusters Intelligente Batteriezellproduktion (InZePro) des Bundesforschungsministeriums ein. Am ZSW werden alle Produktionsschritte der Projektpartner durch KI-Modelle abgebildet und anschließend in selbstlernenden digitalen Zwillingen als Gesamtprozess modelliert und optimiert. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Verhalten des eingesetzten Kneters für die Mischung des Kathodenmaterials bereits gut mit einem KI-Modell abgebildet wird, sodass Abweichungen vom Regelbetrieb sicher erkannt werden können. Gerade die ersten Arbeitsschritte wie Trockenmischen und Kneten stellen in KontEIPro eine Innovation dar, da keine Lösungsmittel eingesetzt werden. Das ZSW unterstützt die Partner von verschiedenen Fraunhofer-Instituten auch durch bildverarbeitende Informationsgewinnung. So werden aus REM-Aufnahmen Informationen zur Größenverteilung der Granulat-Partikel, zum Vermischungsgrad und zu weiteren produktrelevanten Eigenschaften extrahiert.

AI AND BATTERY CELL MANUFACTURE

The ZSW is investing its many years of AI expertise in the field of batteries in the “KontEIPro” project (“Continuous, solvent-free electrode production with intelligent quality assurance and process monitoring coupled with AI”) run within the “InZePro” research cluster (“Intelligent Battery Cell Production”) of the German Federal Ministry of Education and Research. All the production steps of the project partners are reproduced by AI models at the ZSW and then modelled and optimised as an overall process by means of self-learning digital twins. Initial results show that the behaviour of the kneading machine used to mix the cathode material is already well mapped with an AI model, allowing reliable detection of any departures from normal operation. The first steps, such as dry mixing and kneading, constitute new ground in the KontEIPro project. The ZSW also assists the partners at various Fraunhofer institutes with information acquired through image processing. Information on the particle size distribution and the degree of mixing is extracted from SEM images, for example, as well as other product-related properties.



// Größenverteilung der Granulat-Partikel.
// Size distribution of the granulate particles.



QUALITÄTSSICHERUNG UND BETRIEBSSICHERHEIT

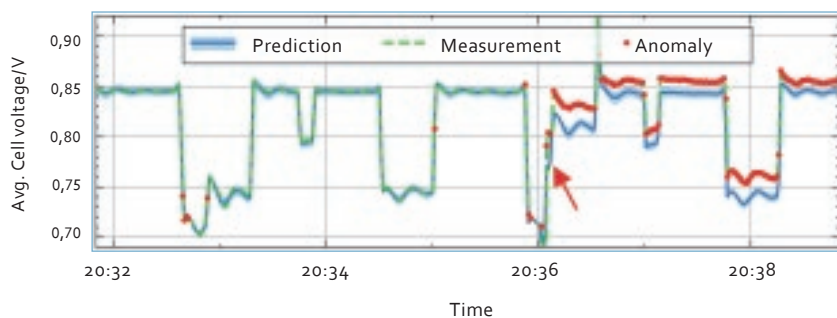
QUALITY CONTROL AND OPERATIONAL SAFETY

KI FÜR BRENNSTOFFZELLENTESTS

Der Betrieb von Brennstoffzellenstapeln auf Testständen wird üblicherweise mithilfe fest eingestellter Alarmgrenzen überwacht. Sobald ein solcher Grenzwert für eine gewisse Zeit überschritten ist, wird der Teststand entweder kontrolliert heruntergefahren oder schaltet sich sofort ab. Aufgrund der breit gefächerten Betriebsbedingungen der Stapel funktioniert diese Art der Überwachung jedoch nur für extreme Betriebsituationen. Zu grobe Grenzen verhindern die Erkennung kleinerer Fehler, wohingegen zu feine Grenzen die Tests häufig unnötig unterbrechen. Aus diesem Grund wird am ZSW eine neuartige Überwachung der Teststände mithilfe KI-basierter Methoden entwickelt. Dabei werden KI-Modelle anhand der umfangreichen historischen Testdaten darauf trainiert, das Betriebsverhalten von Brennstoffzellenstapeln basierend auf gemessenen Betriebsdaten vorherzusagen. Weicht die tatsächliche Messung von der Vorhersage um mehr als die prognostizierte Unsicherheit ab, wird die Messung als nicht plausibel oder fehlerhaft klassifiziert. Dieses Vorgehen wird als Performance Monitoring bezeichnet und eignet sich auch im Betrieb von Brennstoffzellen im mobilen oder stationären Einsatzbereich.

AI IN FUEL CELL STACKS

The operation of fuel cell stacks on test rigs is usually monitored using fixed alarm limits (e.g. pressure, temperature). As soon as any such limit is exceeded for a certain period of time, the test rig is either shut down in a controlled manner or it switches itself off immediately. Due to the wide range of operating conditions of the stacks, however, this type of monitoring only works in extreme operating situations. Threshold limits which are too vague will prevent the detection of minor defects whereas threshold limits which are too refined will often interrupt the tests unnecessarily. This is why a new type of system for monitoring the test rigs using AI-based methods is being developed at the ZSW. AI models are being trained to predict the operating behaviour of fuel cell stacks based on test measurements during operation and an extensive data history. If the actual measurement differs from the prediction by more than the forecast uncertainty, the measurement is classified as implausible or erroneous. This procedure is referred to as performance monitoring and is also suitable for the operation of fuel cells in mobile or stationary applications.



// KI-basierte Fehlererkennung bei Brennstoffzellentests: Ein Ausfall des Druckreglers gegen 20:36 Uhr wurde vom KI-Modell erkannt.

// AI-based failure detection in fuel cell testing: A pressure controller outage at about 8:36 p.m. is detected by the by the AI model.

// Focus Report



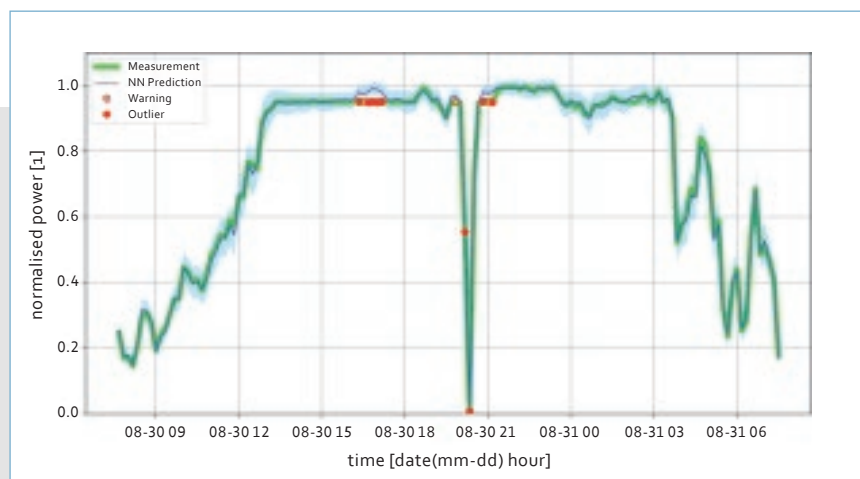
// Foto: Adobe Stock / oida

MONITORING VON WINDENERGIEANLAGEN

Für den Betrieb von Windenergieanlagen ist es wichtig, dass sie stets störungsfrei und mit maximaler Leistung laufen. Moderne Anlagen sind deshalb mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, um den Betrieb zu optimieren. KI-Anwendungen helfen dabei, Fehler möglichst frühzeitig zu erkennen und ein sogenanntes Performance Monitoring für Windenergieanlagen zu realisieren. Das Performance Monitoring erkennt bereits kleinste Abweichungen vom Regelbetrieb sowie Betriebspunkte mit verminderter Leistung. Doch dies ist nur der erste Schritt für den optimierten Betrieb von Windenergieanlagen. Mit KI-Methoden können auch Anlagenkomponenten wie beispielsweise Lager und Getriebe gezielt überwacht werden. Die Überwachungsdaten dienen dann wiederum als Eingangsdaten für weitere KI-Modelle, um Wartungsarbeiten vorausschauend zu planen. Dies verringert nicht nur die Wartungskosten erheblich, sondern erhöht auch gleichzeitig die Verfügbarkeit der Anlagen durch die Vermeidung von weitergehenden Fehlfunktionen und Schäden an Anlagenteilen.

MONITORING OF WIND TURBINES

When it comes to running wind turbines, it is important that there are no malfunctions and that they always deliver the maximum output for the current wind conditions. Modern wind turbines are complex technical systems with a large number of sensors which monitor the various technical components. AI technologies help to keep watch over the systems and sensors, detecting faults as early as possible, and to act as an overall performance monitoring system for wind turbines. The performance monitoring system detects even very small irregularities and deviations from normal operating conditions and identifies any units with reduced power output. But this is only the first step in optimising the performance of wind turbines. It is also possible to monitor specific components (such as bearings and gearboxes) using AI methods. The condition monitoring data will then serve as input data for further AI models with a view to generating predictive maintenance plans. Not only does this bring a significant reduction in maintenance costs but it also increases the availability of the systems at the same time by avoiding further malfunctions and damage to wind turbine components.



// KI-basierte Überwachung und Anomalieerkennung von Windenergieanlagen für Ertragsoptimierung und Predictive Maintenance.

// AI-based monitoring of wind turbines and detection of anomalies for optimised yield and predictive maintenance.



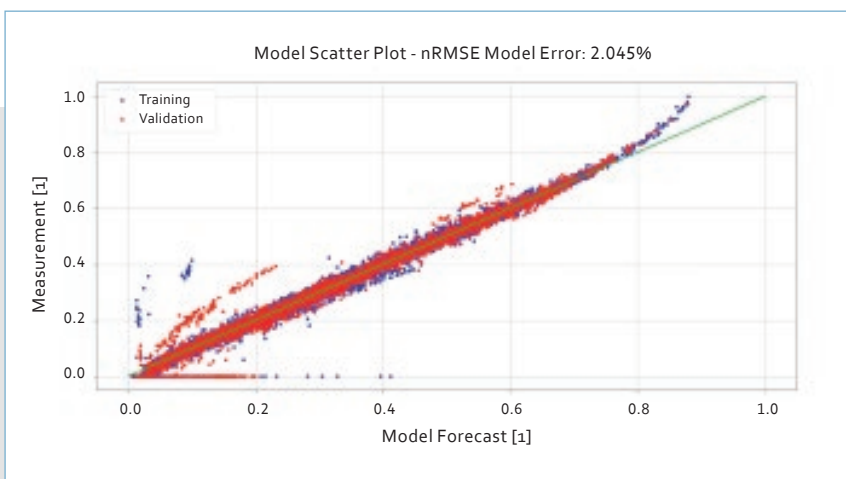
// Foto: Adobe Stock / Piman Khrutmuang

KI AUF DEM WINDTESTFELD

KI-Methoden werden auch für die automatische Qualitätskontrolle der Messmasten auf dem ZSW-Windtestfeld im Rahmen des WINSSENT-Vorhabens eingesetzt. Die KI soll dabei helfen, Fehlmessungen und defekte Sensoren automatisch zu detektieren. Dafür wurden KI-basierte Instrumente entwickelt, welche beispielsweise den Komplettausfall eines Sensors oder Ausreißer in den Messungen sofort bemerken. Für die Fehlersuche und zur frühzeitigen Erkennung von Störungen werden verschiedene Analysemodelle eingesetzt. Die Messdaten der Windmessmasten auf dem Windtestfeld werden für die Entwicklung der KI-basierten Qualitätskontrolle aufbereitet, bereinigt und für die Belernung der KI-Modelle in einer Datenbank bereitgestellt. Anschließend werden die KI-Modelle trainiert. Das Training umfasst mehrere Stufen, die dazu dienen, für unterschiedliche Problemfälle jeweils die optimale KI-Modellarchitektur zu finden. Die KI-Modelle verwenden dabei Daten von zwei Messmasten, um so eine optimale Fehlerabschätzung für die Messdaten in Echtzeit zu realisieren.

AI AT THE WIND TEST SITE

AI methods are also used on the meteorological masts at the ZSW wind test site for automatic quality control in the WINSSENT project. The AI should help to automatically detect incorrect measurements and defective sensors. AI-based methods and models have been developed for this purpose and are able to identify a complete sensor failure, for example, or to spot anomalies in the measurements immediately. Various analysis models are used for troubleshooting and for early detection of faults. The readings taken by the two wind measurement masts at the wind test site are processed and streamlined for the development of the AI-based quality control systems and fed into a database for the teaching of the AI models. The AI models are then trained. The training comprises several stages in a bid to find the optimum AI model architecture for different problem cases. The AI models refer to data from other measurement masts in this process in order to arrive at better estimates of the existing measurement data.



// Windgeschwindigkeits-Überwachung eines Schalenkreuz-Anemometers. Dieses Vorgehen wird am ZSW eingesetzt, um virtuelle Sensoren mit KI-Modellen zu realisieren, komplexe Messsysteme zu überwachen, Fehlfunktionen in Echtzeit zu erkennen und um teure Messsensoren durch KI-Modelle zu ersetzen.

// Wind speed monitored by a cup anemometer. This method is used at the ZSW to enable virtual sensors with AI models, to monitor complex measuring systems, to detect malfunctions in real time and to replace expensive measuring sensors with AI models.



//Foto: Adobe Stock / bennytrapp

GEFÄHRDETE VOGELARTEN SCHÜTZEN

Eines der wichtigsten Vorhaben der neuen Bundesregierung im Bereich Klimaschutz ist die Beschleunigung beim Ausbau der Windenergie. Wichtiger Hebel hierfür ist die bessere Vereinbarkeit von Windenergienutzung und Artenschutz. Dieses Ziel soll durch den Einsatz von technischen Detektionssystemen erreicht werden. Das ZSW hat dazu den BirdRecorder als Prototyp im Rahmen eines vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) geförderten Forschungsvorhabens entwickelt.

Der BirdRecorder ist ein kamerabasiertes System mit bis zu acht fest installierten Kameras und einem nachgeführten Stereokamera-paar. Das System erkennt Vögel im Umkreis von bis zu 700 Metern und ist dadurch in der Lage, Windenergieanlagen rechtzeitig abzuschalten, wenn sich gefährdete Vogelarten wie Rot- und Schwarzmilane der Anlage nähern. Die fest installierten Kameras haben eine Rundumsicht und erfassen alle beweglichen Objekte. Diese werden mit einer am ZSW entwickelten KI unter anderem in die Kategorien Milan, andere Vogelarten oder Flugzeug klassifiziert. Wird ein Milan erkannt, wird dieser mit einer Stereokamera anvisiert, Bilder aufgenommen, dreidimensional verortet, sicher klassifiziert und getrackt. Fliegt der Milan in den Gefahrenbereich einer Windkraftanlage, wird die Anlage in den sogenannten Trudelmodus versetzt, sodass der Rotor in angemessener Zeit zum Stillstand kommt. Verlässt der Milan den Gefahrenbereich, kann die Windenergieanlage wieder anlaufen. Damit werden pauschale Abschaltzeiten vermieden, der Ertrag von Anlagen erhöht und gleichzeitig Kollisionen von Milanen mit Windenergieanlagen verhindert. Somit hilft auch hier der Einsatz von KI, den Windkraftausbau zu beschleunigen und damit die Belange der Energiewende mit dem Vogelschutz zu vereinbaren.

PROTECTION OF ENDANGERED SPECIES OF BIRDS

One of the most important strategies adopted by the new German government in the face of climate change is to accelerate the expansion of wind energy. One key aim in this plan is to reconcile the use of wind energy with the protection of wildlife to better effect. This goal is to be achieved through the use of technical detection systems. The ZSW has developed the BirdRecorder prototype to this end in a research project funded by the Federal Agency for Nature Conservation (BfN).

The BirdRecorder is a camera-based system with up to eight permanently installed cameras and a tracking stereo camera. The system detects birds within a radius of up to 700 metres and is therefore able to shut wind turbines down in time if endangered bird species like red kites and black kites approach the turbine. The permanently installed cameras have an all-round view and record all moving objects. These are categorised as kites, other bird species or aircraft with an AI system developed at the ZSW. If a kite is detected, it is sighted with a stereo camera, photographed, located in a three-dimensional frame, reclassified and tracked. If the kite flies into the danger zone around a wind turbine, the system is put into idling mode so as to bring the rotor to a standstill in time. Once the kite leaves the danger zone, the wind turbine can start up again. This avoids general shutdown times, increases turbine yield and, at the same time, prevents kites from colliding with wind turbines. So this is another way in which the use of AI is helping to hasten the expansion of wind power and to reconcile the interests of the energy transition with bird conservation.



// Kamerasystem des BirdRecorders auf dem Dach des ZSW in Stuttgart.

//The system BirdRecorder on the roof of the ZSW building in Stuttgart.

// Focus Report



KI-LAB FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN

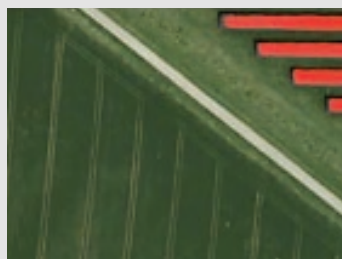
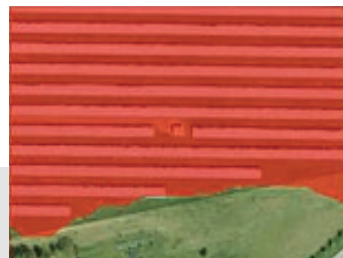
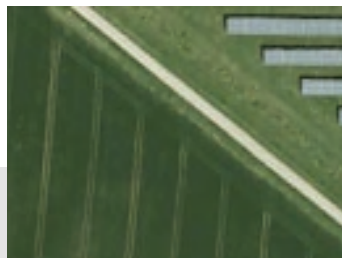
Zu den Innovationstreibern im Bereich der erneuerbaren Energien gehören vor allem Start-ups sowie kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Mit dem KI-Lab.EE unterstützt das ZSW diese Zielgruppe beim Einstieg in die KI. Die KI-Lern- und Anwendungsplattform steht dabei allen Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der erneuerbaren Energien offen. Das ZSW bietet Unternehmen nicht nur Beratung im Einsatz von KI, sondern unterstützt und begleitet über die Plattform KI-Lab.EE den Test-Before-Invest-Ansatz. Unternehmen aus dem EE-Bereich können sich kostenlos auf der KI-Plattform registrieren, um mit ihren Daten KI-Modelle beispielsweise für Prozessoptimierung in der Fertigung und Qualitätskontrolle oder für neue KI-basierte Geschäftsmodelle zu trainieren und zu testen. Die Unternehmen erhalten hierbei in fünf Schritten ein KI-Modell, für das sie kein Expertenwissen über KI benötigen.

Zunächst werden die Daten hochgeladen und im geschützten Rechenzentrum am ZSW verarbeitet. Dann setzt die automatische

AI LAB FOR RENEWABLE ENERGIES

Innovation in the field of renewable energies is mainly being driven by start-ups and small and medium-sized enterprises (SMEs). The ZSW is helping this target group with the introduction of AI through the "AI Lab for Renewable Energies" (KI-Lab.EE). This AI learning and application platform is open to all companies along the entire value-added chain in renewable energies. Not only does the ZSW offer enterprises advice on the use of AI but, through the KI-Lab.EE platform, it also provides support and guidance for businesses adopting the test-before-invest approach. Companies from the renewable energy sector can register free of charge on the AI platform and upload their data in order to train and test AI models for various purposes, such as process optimisation in manufacturing and quality control, or for new AI-based business models. Enterprises follow a five-step plan to arrive at an AI model for which they do not need any expert knowledge of AI.

Firstly, the data are uploaded and processed in the secure data centre at the ZSW. Then the automatic phase starts in which the



// Pilotanwendung von KI im Rahmen des KI-Lab für Erneuerbare Energien: KI-basierte Bildsegmentierung für die Erkennung von PV-Dach- und Freifeldanlagen aus Satellitendaten.
// Pilot AI application in the AI Lab for Renewable Energies: AI-based image segmentation for the detection of roof-mounted and free-standing PV systems from satellite data.

// Focus Report

Prozessierung ein, bei der die Daten vorverarbeitet und normiert werden. Fehlerhafte Daten und redundante Werte werden aussortiert. Das Training verschiedener KI-Modellklassen mit Auto-ML kann dann auf der No-Code-KI-Plattform unmittelbar gestartet werden. Das ausgewählte KI-Modell wird anhand der verwendeten Daten intelligent optimiert, trainiert und anhand von Testdaten bewertet. Danach können die Ergebnisse analysiert werden: Anschauliche und problemorientierte Grafiken helfen dabei. Eine Sensitivitätsanalyse der Eingangsdaten wird durchgeführt, ebenso eine automatisierte „Feature Selection“ für die optimale Auswahl der wichtigen und notwendigen Eingangsparameter. Mit der verfügbaren Anomaliedetektion können Datenfehler automatisch identifiziert und entfernt werden. Vielfältige Visualisierungswerkzeuge für weitergehende Daten- und KI-Modellanalysen sind ebenso verfügbar. Die trainierten und validierten KI-Modelle können exportiert und dann innerhalb der IT-Umgebung des eigenen Unternehmens eingesetzt werden. So können Unternehmen mit dem KI-Lab.EE ohne Risiko erproben, welche Vorteile der Einsatz von KI für ihr Unternehmen bringt und somit fundierte zukunftsweisende Entscheidungen zum weitergehenden KI-Einsatz und Rollout im Unternehmen treffen. Mit der Beratung durch die KI-Expertinnen und -Experten des ZSW kann der KI-Einsatz flankiert werden.

Im Rahmen des KI-Lab.EE unterstützte das ZSW bereits mehr als zehn KMU, Start-ups und Unternehmen in Baden-Württemberg beim Einsatz neuester, innovativer KI-Methoden. Eine dieser Firmen ist ein Freiburger Start-up, das sich zur Aufgabe gemacht hat, die Energiewende in die Städte zu bringen. Hierfür bietet das Unternehmen den zentralen Akteuren im Energiesektor die benötigten Daten- und Entscheidungsgrundlagen. Das ZSW arbeitete mit dem Start-up bei der Segmentierung von Photovoltaik und Solarthermie-Anlagen aus Satellitendaten zusammen.

data are preprocessed and standardised. Incorrect data and redundant values are weeded out. Work can then begin straight away on training different AI model classes with AutoML on the no-code AI platform. The selected AI model is optimised and trained in an intelligent process based on the data used and evaluated using test data. The results can then be analysed, a process aided by clear graphics and problem-oriented diagrams. The input data undergo a sensitivity analysis, and an automated “feature selection” is carried out so as to optimise the input parameters, choosing those which are key and essential. The anomaly detection function allows the automatic identification and removal of data errors. There are also various visualisation tools for further data and AI model analyses. The trained and validated AI models can be exported and then used by the company in its IT system. The KI-Lab.EE therefore enables companies to investigate the potential advantages of using AI in their business environments without taking any risks and provides them with a sound basis for making decisions on the future use and roll-out of AI in the company. The use of AI can be accompanied by advice from the AI experts at the ZSW.

The ZSW has supported more than 10 SMEs, start-ups and companies in Baden-Württemberg with their use of the latest innovative AI methods during the KI-Lab.EE project. One of these companies is a Freiburg start-up which has set itself the task of bringing the energy transition to the towns and cities. To this end, the enterprise is providing the key players in the energy sector with the necessary baseline data and foundations for making decisions. The ZSW worked with the start-up on the segmentation of photovoltaic and solar energy systems from satellite data.



// Foto: Adobe Stock / LV DESIGN



// Foto: Adobe Stock / metamoreworks

BLICK IN DIE ZUKUNFT

Künstliche Intelligenz wird sich in vielen Bereichen durchsetzen, weil sie einen entscheidenden ökonomischen Erfolgsfaktor aufweist: Eine Studie im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums hat ergeben, dass Unternehmen, die Künstliche Intelligenz einsetzen, nicht nur innovativer sind, sondern auch bei gleichem Umsatz einen höheren Gewinn erzielen und zusätzliche Arbeitsplätze schaffen. Eine wichtige Voraussetzung für alle KI-Anwendungen ist das Vorhandensein von Daten hinreichender Güte, denn „Daten sind das Gold des 21. Jahrhunderts“. Wo die Innovationsfreude des Mittelstands auf die Einsatzmöglichkeiten Künstlicher Intelligenz trifft, da sind die Chancen so groß wie die Anwendungsfelder. Das trifft besonders im Kontext einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft und des Prinzips „Cradle to Cradle“ zu, wo datengetriebene KI-Methoden das volle Potenzial für „zero emission“-Produktzyklen unterstützen. Am ZSW wollen wir Innovation und Unternehmertum anwendungsorientiert zusammenführen, damit der Technologietransfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft gelingt und die Energiewende für die heimische Industrie auch zu einer ökonomischen Erfolgsgeschichte wird.

// Foto: Adobe Stock / oida

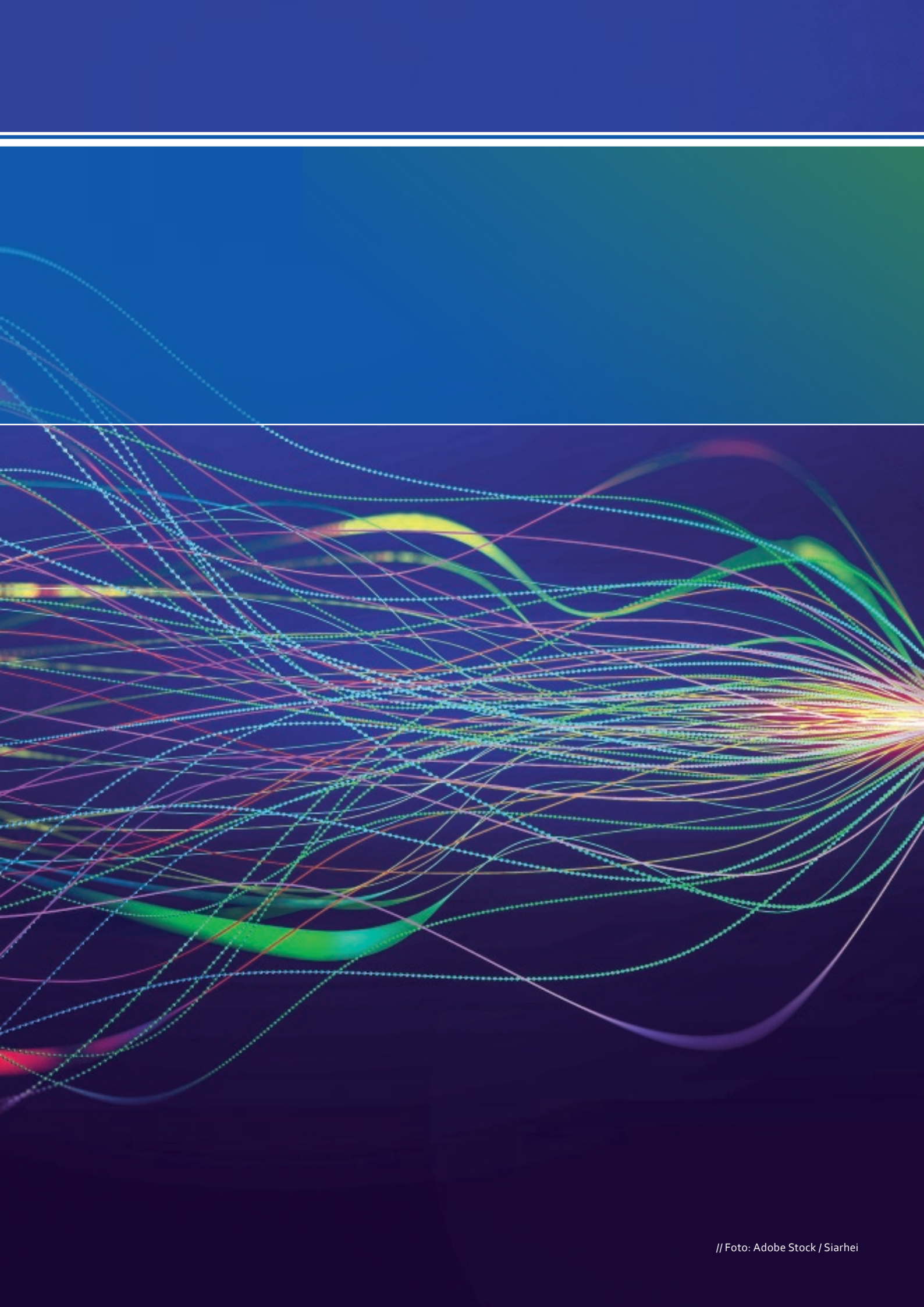
FUTURE PROSPECTS

Artificial intelligence will hold sway in many sectors because it is a key economic success factor, as claimed in a study commissioned by the Federal Ministry for Economic Affairs showing that companies which use artificial intelligence are not only more innovative but also make more profit with the same turnover and create additional jobs. One important prerequisite for all AI applications is the availability of data of sufficient quality because “data is the gold of the 21st century”. In places where the innovative spirit of small and medium-sized enterprises meets the capabilities of artificial intelligence, the opportunities are as great as the fields of application. This is especially true in the context of a sustainable circular economy and for the principle of “cradle-to-cradle” where data-driven AI methods support the full potential for “zero-emission” product cycles. We want to bring innovation and entrepreneurship together with an eye to practical applications so as to pave the way for the successful transfer of technology from scientific research to business and to turn the energy transition into an economic success story for domestic industry.



// Fachgebiete und
Forschungsprojekte

// Departments and
Research Projects



// Systemanalyse (SYS)

Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Mit der Gestaltung der notwendigen Transformationsprozesse für ein klimaneutrales Energie- und Wirtschaftssystem beschäftigt sich die Systemanalyse. Die Arbeit des Teams „Windenergie“, das gemeinsam mit dem Forschungscluster WindForS im Sommer 2022 das weltweit erste Windenergieforschungstestfeld in bergig-komplexem Gelände in Betrieb nehmen wird, zielt auf den schnelleren Ausbau der Windenergie. Dazu werden technische Lösungen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit sowie der Akzeptanz von Windenergieanlagen entwickelt und erprobt. Über die Naturschutz-Begleitforschung soll der Konflikt zwischen Windenergienutzung und Artenschutz gelöst werden.

Das Team „Simulation und Optimierung“ nutzt Verfahren des maschinellen Lernens, um in den für die Energiewende relevanten Feldern Effizienzgewinne und Prozessoptimierung zu erreichen und neue Produkte, wie Systeme zur Erkennung windenergiegefährdeter Vogelarten, zu entwickeln. Diese Kompetenzen ergänzen das Technologie-Know-how anderer Fachgebiete des ZSW hervorragend.

Gleiches gilt für die strategische Systemanalyse. An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik bewerten wir parallel zur Technologieentwicklung Marktchancen, loten internationale Wettbewerbspositionen aus und analysieren Wertschöpfungspotenziale und Arbeitsplatzpotenziale. Unsere Politikberatung zeigt Hemmnisse auf, bietet Lösungen an und entwickelt neue Instrumente, um Markteintritt und -hochlauf für die jeweiligen Technologien zu unterstützen. Aktuell stehen grüner Wasserstoff, seine Erzeugung, mögliche Anwendungen und Folgeprodukte wie synthetische Kraftstoffe besonders im Fokus.

// Our core areas of expertise

The Systems Analysis department works on the configuration of the necessary transformational processes for a climate-neutral economy and energy system. In line with its stated aim of accelerating the expansion of wind power, the “Wind Energy” team has joined forces with the WindForS research cluster to commission the world’s first wind energy test site in complex mountainous terrain in the summer of 2022. This will involve developing technical solutions and testing ways of increasing the economic efficiency and the public acceptance of wind turbines. The purpose of the accompanying research into nature conservation is to seek to resolve the conflict between the use of wind energy and the protection of wildlife.

The “Simulation and Optimisation” team uses machine learning methods to increase efficiency and optimise processes in the fields relevant to the energy transition and 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. At the interface between science and politics we evaluate commercial opportunities parallel to developments in technology, sound out the position of international competitors, and analyse the potential for added value and job creation. Our policy advice identifies obstacles, offers solutions and develops new instruments to facilitate entry to market and to support commercial ramp-up for the relevant technologies. The focus at present is on green hydrogen, its production, possible applications and downstream products like 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 Entwicklungsländer.“

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt
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 developing countries.”



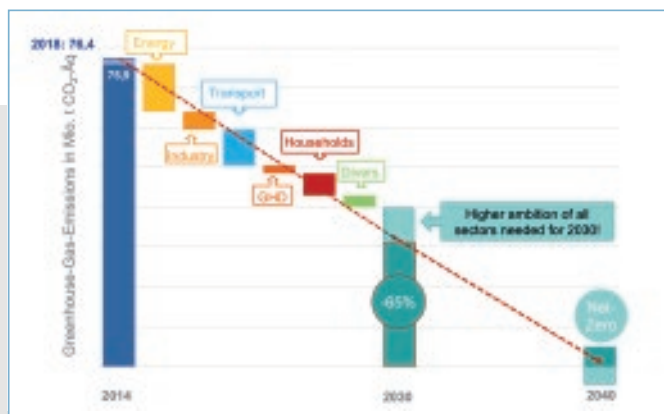
// Foto: Adobe Stock / rogerphoto

// Szenarien für ein klimaneutrales Baden-Württemberg

Mit der Novelle des Landesklimaschutzgesetzes im Oktober 2021 hat die Landesregierung Baden-Württemberg ihre Ziele zur Verringerung der Treibhausgasemissionen deutlich verschärft und das Erreichen der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2040 gesetzlich verankert. Das Fachgebiet Systemanalyse unterstützt gemeinsam mit Partnern die politischen Entscheidungsträger und Entscheidungsträgerinnen des Landes bei der Umsetzung der Ziele. Im Fokus steht die Entwicklung eines Szenarios zum Erreichen der Klimaschutzziele in den Jahren 2030 und 2040.

Für 2030 soll das bereits formulierte, anspruchsvolle Ziel – 65 Prozent weniger Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 – auf die einzelnen Sektoren so aufgeteilt werden, dass die notwendigen Reduktionsbeiträge der jeweiligen Leistungsfähigkeit der Sektoren entsprechen. Gleichzeitig sollen eine faire Lastenteilung erzielt, Strukturbrüche vermieden und die mittel- bis langfristige Bedeutung von natürlichen und technischen Senken berücksichtigt werden. Die Umsetzung der Sektorziele wird im Vorhaben explizit durch die Entwicklung von entsprechenden Maßnahmen unterstützt.

Anschließend wird die erforderliche Transformation in den einzelnen Sektoren für das Erreichen der Nettotreibhausgasneutralität untersucht, um einen Szenariopfad für ein treibhausgasneutrales Baden-Württemberg im Jahr 2040 aufzuzeigen, der auch dem 1,5-Grad-Ziel von Paris gerecht wird. Da Baden-Württemberg hiermit aufgrund der kürzeren Zeitspanne zum Erreichen der Klimaneutralität ein viel ambitionierteres Ziel als Deutschland und Europa verfolgt, wird auch analysiert, was die höhere Dynamik der Treibhausgasreduktion gegenüber dem Bund und Europa bedeutet und wo und wann zusätzliche Maßnahmen des Landes benötigt werden.



// Scenarios for a carbon-neutral Baden-Württemberg

With the amendment of its Climate Change Act in October 2021, the state government of Baden-Württemberg introduced much tougher targets for reducing greenhouse gas emissions and anchored in law its goal of net greenhouse gas neutrality by 2040. The Systems Analysis department and its partners are lending their support to the state policymakers in an effort to help them meet the targets. The focus is on developing a scenario conducive to achieving the climate control targets in 2030 and 2040.

The plan is to meet the ambitious aim which has already been formulated for 2030 – 65 per cent fewer greenhouse gas emissions compared to 1990 – by dividing the burden among the various sectors in due proportion to their individual performance so as to achieve the necessary contributions to the overall reduction. Accompanying aims are to arrive at a fair share of the load, to avoid structural breaks, and to take account of the medium-term to long-term importance of natural decrease and technology-led reduction. All this is flanked in the overall scheme by a specific package of measures designed to meet the targets formulated for the various sectors.

The changes required in the individual sectors to achieve net greenhouse gas neutrality will then be examined in order to carve out a pathway for a greenhouse gas-neutral Baden-Württemberg in 2040, a scenario which will also correspond to the 1.5 degree target set by Paris. Baden-Württemberg is pursuing a much more ambitious target than Germany and Europe given the shorter period of time to achieve climate neutrality, therefore the remit also extends to analysing what the greater drive for greenhouse gas reduction means compared to the German government and Europe, and where and when additional measures will need to be put in place by the federal state.

// Bedeutung des neuen Ambitionsniveaus für Baden-Württemberg (KSG 2021).

// Diagram illustrating the ambitious new targets for Baden-Württemberg.

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt

E-mail: maike.schmidt@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-232

// Tobias Kelm, M. Sc.

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

Phone: +49 711 7870-250

H₂

WASSERSTOFF

// Foto: Adobe Stock /
Alexander Limbach

// Grüner Wasserstoff im Fokus

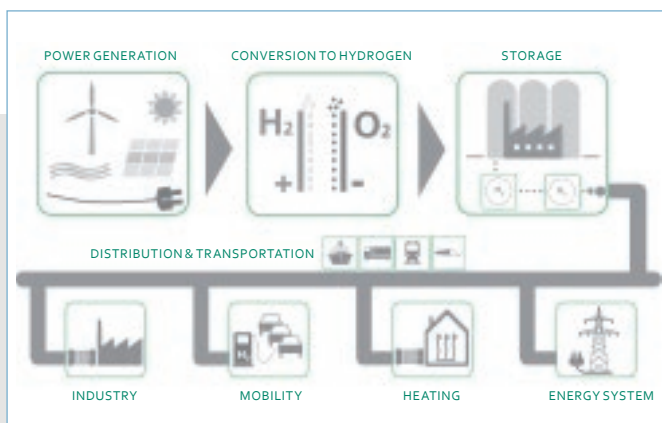
Nur mit grünem Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen können die Klimaziele im Verkehrssektor und in der Produktion – vor allem in der Stahl-, Chemie-, Petrochemie- und Zementindustrie – erreicht werden. Zudem beschleunigt grüner Wasserstoff als Speicher und als systemstabilisierendes Element die Transformation im Stromsektor. In diesem dynamischen Marktumfeld arbeiten wir eng mit dem ZSW-Fachgebiet Regenerative Energieträger und Verfahren zusammen. Mit unseren Markt- und Wettbewerbsanalysen zu Elektrolýsetechnologien unterstützen wir Industriepartner und erforschen neue Geschäftsmodelle für die Erzeugung und den Einsatz von grünem Wasserstoff. In den Projekten „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“ und „eLNG aus Luft“ (beide gefördert vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg) fließt unsere Kompetenz im Bereich Analyse und Berechnung von Umsatz-, Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten ein. Von der Politik wird unsere Erfahrung zur Entwicklung industriepolitischer Strategien genutzt.

Darüber hinaus entwickelt die Systemanalyse Wasserstoff-Roadmaps und Strategien auf verschiedenen politischen Ebenen. Zusammen mit dem Fraunhofer IAO und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wurde im Sommer 2021 eine Wasserstoff- und Brennstoffzellenstrategie für die Region Stuttgart im Auftrag der Wirtschaftsförderung Region Stuttgart erarbeitet. Darüber hinaus sind wir an der Entwicklung einer Wasserstoffstrategie für Brasilien beteiligt. Auch auf der wissenschaftlichen Ebene sind wir gut vernetzt: ZSW-Vorstand Prof. Frithjof Staiß ist Leiter der „Arbeitsgruppe Wasserstoffwirtschaft 2030“ der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften, die sich mit dem Import von grünem Wasserstoff nach Deutschland beschäftigt.

// Green hydrogen in the limelight

The climate targets in the transport sector and in production – especially in the steel, chemical, petrochemical and cement industries – can only be achieved with green hydrogen and synthetic fuels. Green hydrogen as a means of storage and as a stabilising element will also accelerate the transformation in the electricity sector. In this dynamic market environment, we are working closely with the ZSW department of Renewable Fuels and Processes. We are analysing the electrolysis market and the competitors in the field in order to assist industrial partners, and we are exploring new business models for the production and use of green hydrogen. Our expertise in analysing and calculating the impact on sales revenue, added value and employment is being invested in the projects “Electrolysis Made in Baden-Württemberg” and “eLNG from Air” (both funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs). Our experience is being used in the political world to inform policy decisions and strategic moves in industry.

The Systems Analysis department is also developing hydrogen road maps and strategies at different political levels. A hydrogen and fuel cell strategy for the Stuttgart region was developed in the summer of 2021 in a joint project with the Fraunhofer Institute for Industrial Engineering IAO and the German Aerospace Center. The study was commissioned by the Stuttgart Region Economic Development Corporation. What is more, we are involved in the development of a hydrogen strategy for Brazil. We also have strong links in the scientific community, with ZSW CEO Prof. Frithjof Staiß heading up the Hydrogen Economy 2030 Working Group at the National Academy of Science and Engineering, a task force looking into the import of green hydrogen to Germany.



// Wertschöpfungskette von Wasserstoff.
// Hydrogen value chain.

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maïke Schmidt
E-mail: maïke.schmidt@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-232



// Mehr Akzeptanz für Windenergie

Um die Akzeptanz der Windenergienutzung zu erhöhen, erforscht das Team Wind gemeinsam mit Partnern in dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojekt "Inter-Wind", welche Faktoren eine Rolle spielen, wenn sich Menschen durch Windenergieanlagen belästigt fühlen. Bislang fehlt ein standardisiertes Vorgehen für die objektive Erfassung von Lärm- und Vibrationsemissionen über längere Zeiträume. Das interdisziplinäre Team erforscht, wie Meteorologie und geologischer Untergrund bei der Schallausbreitung zusammenspielen, wie Geräusche der Anlagen von Menschen beurteilt werden, welche Faktoren die Wahrnehmung beeinflussen und welche Maßnahmen bei bestimmten Wetterlagen als entlastend empfunden werden. Das ZSW erfasst hierfür auf dem ZSW-Windtestfeld und nahe der Windparks Tegelberg und Lauterstein Messdaten zu Windgeschwindigkeit, atmosphärischer Schichtung, Bewölkung und Niederschlag. Die Partner messen zeitgleich die Ausbreitung von Schallwellen in der Luft (Akustik) und elastischen Wellen im Boden (Seismologie). Parallel werden Anwohnerinnen und Anwohner befragt.

Mit der Auswertung der Befragung und der erhobenen Messdaten sollen übertragbare Maßnahmen zur Belästigungsminderung entwickelt und damit letztlich die Akzeptanz der Windenergienutzung erhöht werden. Das Projektkonsortium arbeitet mit der Gemeinde und der Bürgerinitiative Windkraftanlagen Kuchen sowie den Betreibern der Windparks Tegelberg und Lauterstein eng zusammen. Zu den Forschungspartnern gehören die Umwelt- und Sozialpsychologie der Medical School Hamburg, die Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, das Geophysikalische Institut am Karlsruher Institut für Technologie und der Lehrstuhl für Windenergie am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart.

// More acceptance for wind power

In a bid to increase acceptance for the use of wind power, the Wind team and its partners in the Inter-Wind research project, which is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, are asking which factors come into play when people feel that the noise generated by wind turbines is a nuisance. There is no standardised procedure to date for an objective assessment of these emissions over prolonged periods of time. The interdisciplinary team is investigating how meteorology and geological ground conditions interact in sound propagation, what people think about noise from the turbines, which factors influence their perceptions, and which measures are seen as easing the impact in certain weather conditions. For this purpose, the ZSW is collecting data on wind speed, atmospheric stratification, cloud cover and precipitation at the research site and near the Tegelberg and Lauterstein wind farms. At the same time the partners are measuring the propagation of sound waves in the air (acoustics) and of elastic waves in the ground (seismology). Surveys of local residents will be conducted in parallel.

The survey results and the measurements will be analysed with a view to identifying workable solutions and putting measures in place to reduce disturbance and thereby ultimately increasing acceptance for the use of wind power. The project consortium works closely with the local authority and the civic action group on wind turbines in Kuchen and with the operators of the Tegelberg and Lauterstein wind farms. The research partners include the Environmental and Social Psychology unit at the Medical School Hamburg, the Martin Luther University Halle-Wittenberg, the Geophysical Institute at the Karlsruhe Institute of Technology and the Chair for Wind Energy at the University of Stuttgart Institute of Aircraft Design.



// ZSW-Windtestfeld WINSENT.
// ZSW wind test site WINSENT.

// Dipl.-Ing. Andreas Rettenmeier
E-mail: andreas.retttenmeier@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-229

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

// Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschichttechnologien bietet ein hohes Potenzial zur Kostensenkung bei der Herstellung von Photovoltaikmodulen zur Gewinnung von Solarstrom. Das ZSW arbeitet mit Hochdruck an der nächsten Generation der Photovoltaik (PV), den Tandem-Solarmodulen: hocheffizient, flexibel, leicht und kostengünstig in der Herstellung. Mit ihnen lässt sich ein Wirkungsgrad oberhalb des praktischen Wirkungsgrad-Limits der marktbeherrschenden PV-Technologie aus kristallinem Silizium erreichen. Dazu werden zwei Solarzellen kombiniert, deren Materialien mit ihrem jeweiligen Absorptionsbereich das Sonnenspektrum optimal ausnutzen. Das ZSW setzt dabei auf Stapelzellen aus einer Perowskit-Solarzelle mit unterschiedlichen Tandempartnern: CIGS, Silizium oder einem zweiten Perowskit. Hierbei können zudem kostengünstige Drucktechnologien eingesetzt werden.

Zum tieferen Verständnis werden am ZSW grundlegende Arbeiten an Solarzellen und den entsprechenden Herstellungsprozessen zunächst in typischen Laboranlagen durchgeführt, bevor sie im Technikum auf größere Flächen übertragen werden. Dort können Module auf Glas bis zu einer Größe von 30 x 30 cm² weitgehend mit Durchlaufprozessen und damit sehr industriennahen Verfahren entwickelt und hergestellt werden. Dies ermöglicht uns den schnellen Transfer neuer Forschungsergebnisse und Prozesse in die industrielle Fertigung. Auf flexiblen Substraten wie Polymer- oder Metallfolien entwickeln wir im Rolle-zu-Rolle-Verfahren Prozesse für beliebig lange und bis zu 30 cm breite Dünnschichtmodule. Die Anwendungen liegen vor allem in der integrierten Photovoltaik: Solarmodule an Fassaden, über Obstplantagen oder im Fahrzeugdach haben großes Potenzial.

Auf Basis unserer langjährigen Erfahrungen mit der Entwicklung und Charakterisierung von Dünnschicht-Solarmodulen bearbeiten wir im Kundenauftrag vielfältige prozesstechnische und materialanalytische Aufgabenstellungen.

// Our core areas of expertise

There is great potential in the use of thin-film technologies for the reduction of costs in the manufacture of photovoltaic modules for the generation of solar power. The ZSW is working at full stretch on the next generation of photovoltaics (PV): tandem solar cells which are highly efficient, flexible, lightweight and inexpensive to manufacture. The use of these makes it possible to reach a level of efficiency above the limit achieved in practice by the crystalline silicon technology which dominates the PV market. The process involves taking two solar cells and combining the absorption ranges of the materials, thereby making optimum use of the solar spectrum. The ZSW uses stacks made from a perovskite solar cell paired with CIGS, silicon or a second perovskite. The technology also lends itself to cost-effective printing options.

Basic work is carried out on solar cells and the corresponding manufacturing processes in typical laboratory settings at the ZSW in the first instance in order to gain a deeper understanding before scaling up to larger sizes in the pilot plant. It is then possible to develop and manufacture modules on glass measuring up to 30 x 30 cm², mainly using continuous processes very similar to industrial production lines. This enables us to act quickly in transferring new research findings and production processes to industry. Working on flexible substrates, such as polymer foil or metal foil, we develop roll-to-roll processes for thin-film modules up to 30 cm wide and of any length. The primary use cases are in integrated photovoltaics, with solar modules on buildings, above orchards or on top of vehicles offering great potential.

Drawing on many years of experience in developing and characterising thin-film solar modules, we carry out a wide range of process engineering and material analysis jobs on the instructions of various customers.



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

// 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 for new applications."



// Perowskit-Solarzellen-Herstellung mit umweltverträglichem Lösemittel

Perowskit-Solarzellen können mit kostengünstigen Methoden aus Tintenlösungen hergestellt werden und haben unlängst Rekord-Wirkungsgrade von bis zu 25,5 % auf kleinen Labormaßstabsflächen erzielt. Dabei werden allerdings fast ausschließlich gesundheits- und umweltschädliche Lösungsmittel wie Dimethylformamid (DMF) verwendet. Für eine industrielle großflächige Beschichtung von Perowskit-Solarzellen ist daher die Entwicklung von Verfahren mit weniger kritischen Lösemitteln dringend notwendig.

Aufgrund der benötigten chemischen Eigenschaften kommen nur sehr wenige umweltverträgliche Lösemittel in Frage. Am ZSW wird hierfür Dimethylsulfoxid (DMSO) genauer untersucht, das den Beschichtungsprozess deutlich herausfordernder macht. So führt die hohe Oberflächenspannung zu einer schlechten Benetzung und der relativ hohe Siedepunkt des Lösemittels zu einem veränderten Trocknungsverhalten.

Mit den richtigen Tricks konnten am ZSW dennoch mittels eines skalierbaren Filmziehverfahrens leistungsfähige Perowskit-Absorberschichten hergestellt werden. Um die Entnetzung der DMSO-Lösung zu verhindern und einen adäquaten Trocknungsprozess zu erreichen, wurden ein Netzmittel aus Siliziumoxid-Nanopartikeln und eine gasgestützte Trocknungsmethode eingesetzt. Im Vergleich zum unerwünschten Lösemittelgemisch wurden die gleichen Trends in Morphologie und Kristallinität des Absorbers beobachtet sowie vergleichbare Zelleffizienzen von 16,7 % erzielt. Somit konnte demonstriert werden, dass umweltverträgliche Lösemittel für die Produktion von Perowskit-Solarzellen verwendet werden können. Damit wurde ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg der Perowskit-Solarzellen in die industrielle Fertigung erreicht.

Die Arbeit wurde in der Fachzeitschrift ACS Applied Energy Materials veröffentlicht. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsaem.1c02425>

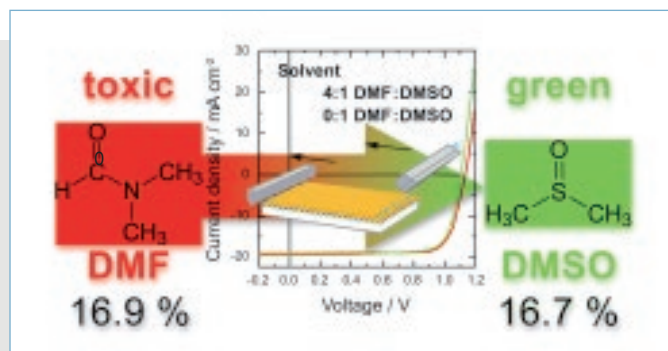
// Manufacture of perovskite solar cells with sustainable solvent

Perovskite solar cells can be made from ink solutions using inexpensive methods and have recently achieved record efficiency levels of up to 25.5 % on small areas in tests on a laboratory scale. It is the case, however, that the solvents used almost exclusively in this process, such as dimethylformamide (DMF), are harmful to health and the environment. There is therefore an urgent need to develop processes using less problematic solvents for the coating of perovskite solar cells on an industrial scale.

There are precious few solvents with the necessary environmental credentials for the process due to the chemical properties required. The ZSW is taking a closer look in this respect at dimethyl sulphoxide (DMSO) which makes the coating process much more challenging. The high surface tension leads to a poor wetting action, for example, and the relatively high boiling point of the solvent changes the drying properties.

A clever way of producing perovskite absorber layers was discovered at the ZSW using a scalable film-drawing process. A silica nanoparticle wetting agent and a gas-assisted drying method were used in order to prevent the dewetting of the DMSO solution and to obtain a suitable drying process. When contrasted with the undesirable solvent mixture, the same trends in absorber morphology and crystallinity were observed, and comparable cell efficiency levels of 16.7 % were achieved. These results demonstrated that environmentally safe solvents can be found for the production of perovskite solar cells. This marked an important milestone on the journey to industrial production for perovskite solar cells.

The research paper was published in the journal ACS Applied Energy Materials. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsaem.1c02425>



// Transformation von giftigem Standard-Lösemittel zu umweltverträglichem Lösemittel.

// Transformation of toxic standard solvent to sustainable ("green") solvent.

// Dr. Erik Ahlswede

E-mail: erik.ahlswede@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-247



// Neues Perowskit-Beschichtungscluster

Hocheffiziente Perowskit-Solarzellen können aus lösungsbasierten Tinten oder mittels vakuumbasierter Verdampfungsprozesse hergestellt werden. Das ZSW entwickelt beide Ansätze stetig weiter und hat sich 2021 insbesondere im Bereich der Verdampfungstechnik neue Möglichkeiten der Prozessentwicklung geschaffen. Dabei werden zum einen alle Prozessschritte unter Inertgas-Bedingungen in sog. Gloveboxsystemen umgesetzt, um eine hohe Reproduzierbarkeit und Qualität der Schichten zu erzielen, zum anderen werden neue Beschichtungsanlagen für Vakuumprozesse eingebunden. Ein großer Schritt auf diesem Weg ist eine Cluster-Beschichtungsanlage, die mit Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums im Projekt CAPITANO beschafft und im Jahr 2021 schrittweise in Betrieb genommen wurde. Sie umfasst vier Beschichtungskammern, die um einen Zentralroboter gruppiert sind und verschiedenste Schichten und Verfahren übernehmen – von gesputterten transparenten Schichten über verdampfte metallische oder organische Schichten bis hin zur optimierten Vakuumbeschichtung von Perowskiten in einer speziell ausgelegten Vakuumkammer. Hier sind zukünftig mit bis zu sechs Quellen gleichzeitig oder sequenziell Mehrkomponenten-Perowskit-Schichten mit hoher Homogenität herstellbar.

Erste Optimierungen im Zellaufbau mit aufgedampften organischen Elektronenleiterschichten wurden bereits durchgeführt. Diese ermöglichen eine definierte Beschichtung mit gleichbleibender Dicke auf der körnigen Perowskit-Oberfläche. Dadurch können die Reproduzierbarkeit und die Homogenität der Grenzflächen gesteigert werden. Mit den aufgedampften Elektronenleiterschichten wurden bereits vergleichbare Wirkungsgrade wie mit der nasschemischen Referenz erreicht.

// New perovskite coating cluster

Highly efficient perovskite solar cells can be made from solution-based inks or by means of vacuum-controlled evaporation processes. The ZSW is constantly looking to make advances in both approaches and in 2021 opened new doors in process development, especially in the field of evaporation technology. Firstly, all the steps take place under inert gas conditions in so-called glove box systems in order to achieve layers of a high quality with a high level of reproducibility and, secondly, new coating systems for vacuum processes have been integrated. One major step on the path is a cluster coating system which was procured with funds from the German Federal Ministry for Economic Affairs in the CAPITANO project and was gradually put into operation in 2021. It comprises four coating chambers which are grouped around a central robot and are capable of performing all manner of deposits and processes – from transparent sputter coatings and metallic or organic vapour deposition layers right through to optimised techniques for perovskite vacuum coating in a specially designed vacuum chamber. In the future it will be possible to produce multi-component perovskite coatings here with a high level of homogeneity with up to six sources simultaneously or sequentially.

The first improvements have already been made in the cell structure with organic electron conductor vapour deposition coatings, allowing the application of a layer of consistent thickness on the rough perovskite surface. This makes it possible to increase the reproducibility and homogeneity of the boundary layers. Levels of efficiency comparable to the benchmark in wet chemical methods have already been achieved with the vapour-deposited electron conductor layers.



// Blick in die neue Cluster-Beschichtungsanlage für Perowskit-Solarzellen im ZSW-Labor.

// The new cluster coating system for perovskite solar cells in the ZSW laboratory.

// Dr. Erik Ahlswede

E-mail: erik.ahlswede@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-247



// Beste Bedingungen für hocheffiziente Solarzellen

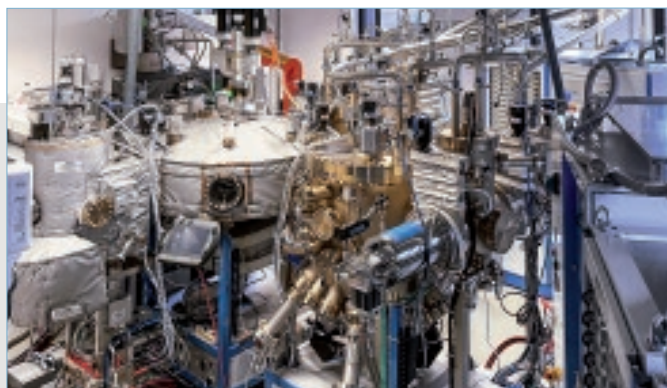
Die Inbetriebnahme eines neuen Clustersystems im Rahmen des Projekts CIGS-Cluster des Bundeswirtschaftsministeriums schafft die Voraussetzungen für die Entwicklung neuester Solarzellengenerationen. In zwei Molekularstrahl-Epitaxiekammern (MBE) können im Ultrahochvakuum dünne lichtabsorbierende Schichten unter hochreinen Bedingungen abgeschieden werden. Die Abscheidung und der Wachstumsprozess werden dabei in situ mit mehreren Analysetechniken beobachtet, was eine ideale Reproduzierbarkeit ermöglicht. Unter anderem können anhand von zeitabhängigen Messungen der Reflexion für einen breiten Wellenlängenbereich die Schichtdicke, die minimale Bandlücke und die Rauigkeit der Schicht beobachtet werden. Die beiden MBE-Kammern sind über eine zentrale Verteilerkammer mit einer Hochvakuumkammer für Sputterbeschichtungen verbunden. Dort ermöglicht eine neue Kathodenkonstellation besonders sanfte Prozesse für die schadigungsarme Herstellung transparenter leitfähiger Kontaktschichten.

In der Clusteranlage werden unter hervorragenden Bedingungen neueste Prozesse für Solarzellen auf der Basis von $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Absorberschichten erforscht und die physikalischen Grenzen des Materialsystems ausgelotet. Die gewonnenen Erkenntnisse sind wichtige Impulsgeber für die weitere industrielle Umsetzung der Technologie. Die Schichten kommen sowohl als Einzelzellen als auch als untere Zelle in einem Tandemsolarzellenstapel zum Einsatz. Sehr vielversprechend ist letzterer Ansatz insbesondere in Kombination mit Perowskit-Solarzellen.

// Best conditions for highly efficient solar cells

A new cluster system put into operation in the course of the CIGS cluster project run by the German Federal Ministry for Economic Affairs has laid the foundation for the development of the latest generation of solar cells. There are two molecular beam epitaxy (MBE) chambers where thin light-absorbing layers can be deposited under ultra-high vacuum in high-purity conditions. The deposition and the growth process are observed in situ using several analysis techniques, allowing an ideal basis for reproducibility. Various parameters can be monitored, such as coating thickness, minimum band gap and surface finish, with the help of time-related measurements of the reflection for a broad wavelength range. The two MBE chambers are connected to a high-vacuum chamber for sputter coatings via a central distribution chamber. Here there is a new cathode constellation for very gentle processes for the production of transparent conductive contact layers, allowing great care to be taken so as to keep damage to a minimum.

The conditions in the cluster facility are excellent for conducting research into the latest processes for solar cells based on $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ absorber layers and for exploring the physical limits of the material system. The key findings are important when it comes to making progress with the industrial roll-out of the technology. The layers are used both as individual cells and as bottom cells in a tandem stack. This approach is particularly promising in combination with perovskite solar cells.



// Neue Cluster-Anlage des ZSW zur Abscheidung dünner Absorberschichten für CIGS- oder Tandem-Solarzellen unter hochreinen Bedingungen.

// The new MBE cluster system for CIGS or multi-junction thin-film solar cells in the ZSW laboratory under high-purity 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 von Qualität und Zuverlässigkeit von Photovoltaik-(PV-)Modulen sowie der effiziente Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder des Fachgebiets und seiner Kunden. Seit Jahrzehnten werden im Testlabor Solab und auf dem Freiland-Testfeld Widderstall PV-Module und -Systeme hinsichtlich Energieertrag und Langzeitstabilität vermessen und charakterisiert. Die entwickelten Methoden fließen bei der Mitarbeit in Normungsgremien ein und kommen unseren Kunden zugute.

Der Bedarf an schadensanalytischen Untersuchungen von PV-Modulen aus Solarparks nimmt deutlich zu. Qualitätsprobleme mit polymerbasierten Modulrückseiten bilden dabei einen Schwerpunkt und werden sowohl im Testlabor als auch vor Ort im Solarpark vom ZSW untersucht. Weiterhin besteht ein deutlicher Bedarf an Beratungsdienstleistungen zur Qualitätssicherung von PV-Modulen für geplante PV-Projekte.

Mit dem Ziel, Gebäudeflächen zur nachhaltigen Stromerzeugung zu nutzen, arbeitet das ZSW mit Architekten, Planern und Bauherren an Projekten für fassadenintegrierte Photovoltaiksysteme zusammen. Durch gute Beratung und Schulung der beteiligten Akteure werden Hürden für die Installation dieser Systeme verringert. Die geeignete Verknüpfung mit elektrischen Speichern, die Kopplung der Nachfragesektoren und Lastverschiebung erhöhen die lokale Nutzung von Solarstrom, entlasten die Verteilnetze und tragen dezentral zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch bei. Die Analyse entsprechender Potenziale sowie die Entwicklung von Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten bei unseren Kunden einschließlich geeignetem Lademanagement für die Elektromobilität sind daher weiterführende Themen im Fachgebiet. Das ZSW liefert außerdem Prognosen von Erzeugung und Last für den Datenaustausch zwischen den Netzbetreibern im Rahmen von Redispatch 2.0.

// Our core areas of expertise

The two main subjects of concern for the department and its customers are ensuring the quality and reliability of photovoltaic (PV) modules and facilitating the efficient use of solar power in the energy system. We have spent decades measuring the energy yield and long-term stability of PV modules and PV systems and establishing specifications in the Solab test laboratory and on the Widderstall outdoor test site. The methods which have been developed contribute to the work in standardisation bodies and benefit our customers.

There is a significant increase in the need for analysis of PV modules from solar parks with a view to diagnosing damage and failure. One major focus is on quality problems with the polymer-based rear which we examine both in the test laboratory and on site in the customer's solar park. There is also a clear need for quality control consultancy services when sourcing modules for PV projects.

The ZSW works with architects, planners and developers on building-integrated photovoltaics projects with the aim of using building surfaces for sustainable power generation. The obstacles to installing these systems are reduced through good advice and training for the parties involved. Suitable connections with electrical storage facilities and linking of the consuming sectors and load transfer increase the local use of solar power, shift the load from the distribution grids, and help to balance generation and consumption at local level. The analysis of potential and the development of algorithms for the optimised operation of generators, storage facilities and supplies at our customers, including the management of suitable charging systems for electric vehicles, are therefore also within the wider remit of the department. The ZSW also provides generation forecasts and load data for exchange between the grid operators under the Redispatch 2.0 grid management scheme.



„Photovoltaik ist ein Schlüssel für die nachhaltige Energieversorgung – wir kümmern uns um Qualität, Ausbau und die effiziente Nutzung von Solarstrom.“

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

"Photovoltaics technology is key to the sustainable supply of energy – we take care of the quality, development and efficient use of solar power."



// Foto: Adobe Stock / 4th Live Photography

// Prosumerlastprofile für eine genauere Abschätzung des Energiebedarfs von Haushalten

Standardlastprofile (SLP) werden von Energieversorgern seit Jahrzehnten verwendet, um den zeitabhängigen Strombedarf von Haushalten abzuschätzen. Sobald Kunden mit PV-Anlagen jedoch einen Teil ihres Strombedarfs selbst decken, werden sie zu sogenannten Prosumern, die den eigenen Restbedarf an Strom über Tag zu jeder Jahreszeit reduzieren.

Um das Prosumerverhalten am Energiemarkt besser abbilden zu können, hat das ZSW Prosumerlastprofile (PLP) entwickelt. Selbst bei der Anwendung von wetterunabhängigen PLP kann der Fehler im Energieeinkauf beim Netzbetreiber gegenüber der gängigen Praxis, ein gewichtetes SLP („weighted SLP“ in der Abbildung unten) zu nutzen, um den Faktor 2 reduziert werden. Denn Letzteres berücksichtigt lediglich den um die PV-Erzeugung reduzierten Jahresbedarf des Prosumers, bildet jedoch das veränderte Tagesprofil nicht ab. Dadurch unterschätzt es regelmäßig den Strombedarf über Nacht und überschätzt den Bedarf über Tag. Ähnliche Resultate konnten unter Berücksichtigung von Batteriespeichern erzielt werden.

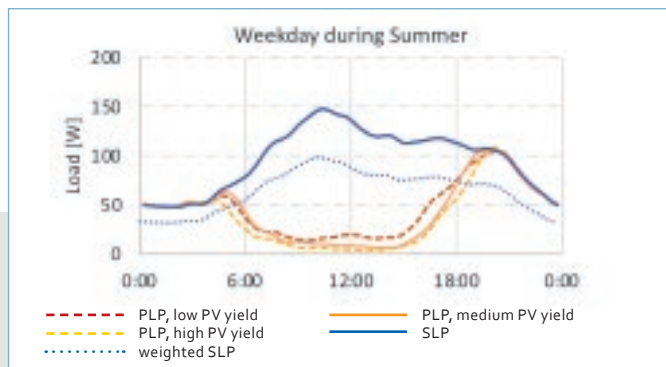
Die zunehmende Durchdringung von Elektromobilität und der Einbau von immer mehr Wärmepumpen in Bestandsimmobilien verändern den Strombedarf von Prosumern ebenfalls. Weitere Arbeiten des ZSW zur Abschätzung von durchschnittlichen Lade- und Wärmepumpenprofilen unterstützen Energieversorger und Stadtwerke beim genaueren Energieeinkauf sowie Netzbetreiber bei der Infrastrukturplanung.

// Greater accuracy in estimating household energy consumption

Standard load profiles (SLP) have been used by energy suppliers for decades to estimate the amount of electricity consumed by households at specific times. As soon as customers meet some of their electricity requirements themselves with their own PV systems, however, they are referred to as prosumers who are reducing the amount of power they still require throughout the day in every season.

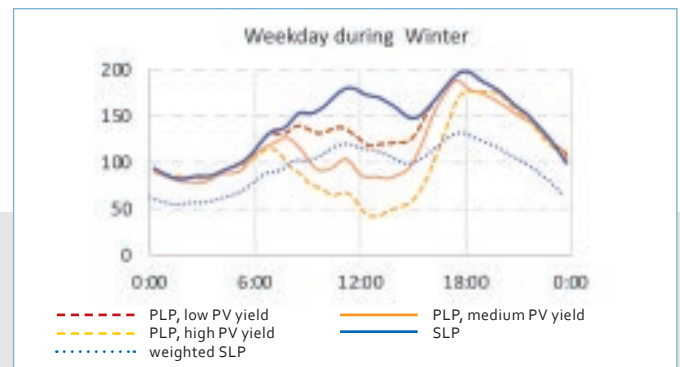
So the ZSW has developed a prosumer load profile (PLP) with a view to being able to gain a more accurate graph of prosumer behaviour on the energy market. Even when using PLP data bearing no relation to the weather, the error in energy purchasing can be reduced by a factor of two when compared with the standard practice of using a weighted SLP (standard load profile). The latter only takes account of the annual amount required by the prosumer minus the supply generated by the PV system, stopping short of recording the changed daytime profile. As a result, it routinely underestimates the power required overnight and overestimates the consumption during the day. Similar results were obtained in an observation of storage batteries.

The increasing pervasion of electric vehicles and the installation of more and more heat pumps in existing properties are also changing the power requirements of prosumers. Other findings obtained by the ZSW on the estimation of average charging patterns and heat pump profiles are helping energy suppliers and public utilities to be more precise in energy purchasing and are assisting grid operators in infrastructure planning.



// Standardlastprofile (SLP) im Vergleich zu den durchschnittlichen Prosumerlastprofilen (PLP) an Tagen mit geringem, mittlerem und hohem PV-Ertrag.

// Standard load profile (SLP) compared to the average prosumer load profiles (PLP) during days of low, medium and high PV yield.



// Ruben Rongstock

E-mail: Ruben.Rongstock@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-356



// Bestimmung des Zugewinns von bifazialen PV-Modulen im Feld

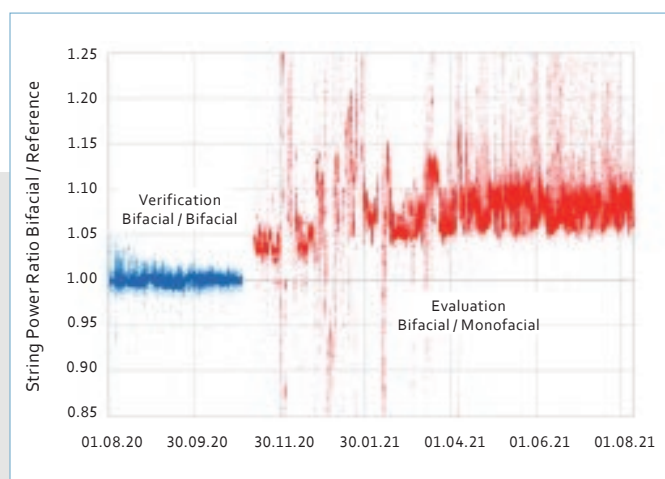
Photovoltaik-Module mit bifazial empfindlichen Solarzellen, die auch die auf die Rückseite einfallende Solarstrahlung nutzen können, werden zunehmend produziert. In Zukunft werden sie voraussichtlich die dominierende Technologie bei PV-Anlagen auf Freiflächen und großen Dächern sein. Aufgrund der Komplexität der Einstrahlungsverhältnisse ist jedoch die Bestimmung des Zugewinns durch die Bifazialität schwierig und somit die Vorhersage von Anlagenertrag und -leistung mit deutlichen Unsicherheiten behaftet.

Das ZSW hat an einem bifazialen PV-System auf dem Testfeld Widderstall eine Methode entwickelt, die es erlaubt, den Bifazialitätsgewinn kontinuierlich im laufenden Betrieb zu ermitteln. In der Testanlage (Abbildung oben) ist bei den bifazialen PV-Modulen einer Teileinheit des PV-Generators die Rückseite abgedeckt. Diese bilden eine monofaziale Referenz für den übrigen, bifazial funktionierenden Teil des PV-Systems. Aus dem Verhältnis der Leistungen des bifazialen und des monofazialen PV-Teilsystems ergibt sich direkt der Zugewinn durch die Bifazial-Technologie (Abbildung unten). Die Methode soll zu einem Verfahren für die Überwachung von PV-Anlagen mit bifazialen Modulen ausgebaut werden.

// Identification of the gains achieved with bifacial PV modules in the field

There is an increase in the production of photovoltaic modules (PV modules) with bifacial solar cells which can also use the sunlight shining on the back. They are expected to be the dominant technology in the future for PV systems in open spaces and on large roofs. Due to the complexity of the exposure conditions, however, it is difficult to assess the gains arising due to the bifacial design, and it is therefore very challenging to predict the system yield and system output with certainty.

The ZSW has developed a method for the continuous recording of the gain during operation of a bifacial PV system at the Widderstall test site. The back of the bifacial PV modules in one PV generator panel is covered in the test system (see photograph above). These form a monofacial reference for the rest of the bifacial part of the PV system. The performance of the bifacial part of the PV system relative to the monofacial part of the PV system is a direct indicator of the gains achieved through bifacial technology (see diagram below). The method is to be developed into a process for monitoring PV systems with bifacial modules.



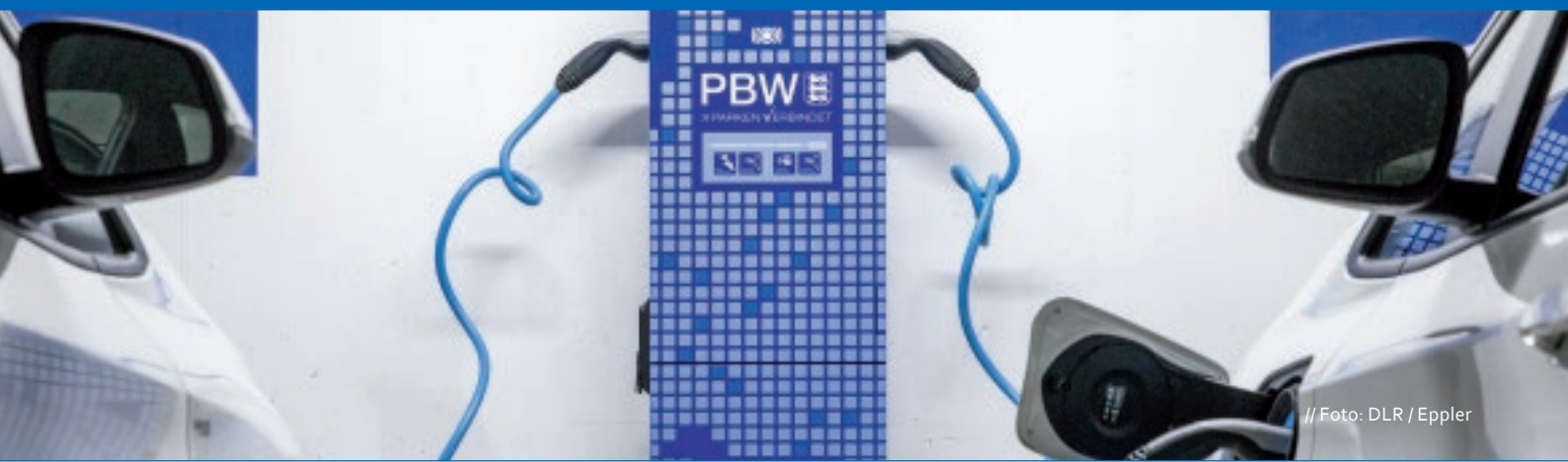
// Zeitverlauf des Bifazialgewinns am ZSW-Testsystem auf dem Solar-Testfeld Widderstall.

// Graph showing bifacial gain over time for the ZSW test system at the Widderstall solar test site.

// Dirk Stellbogen

E-mail: dirk.stellbogen@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-221



// Foto: DLR / Eppler

// Lademanagement für Flottenfahrzeuge

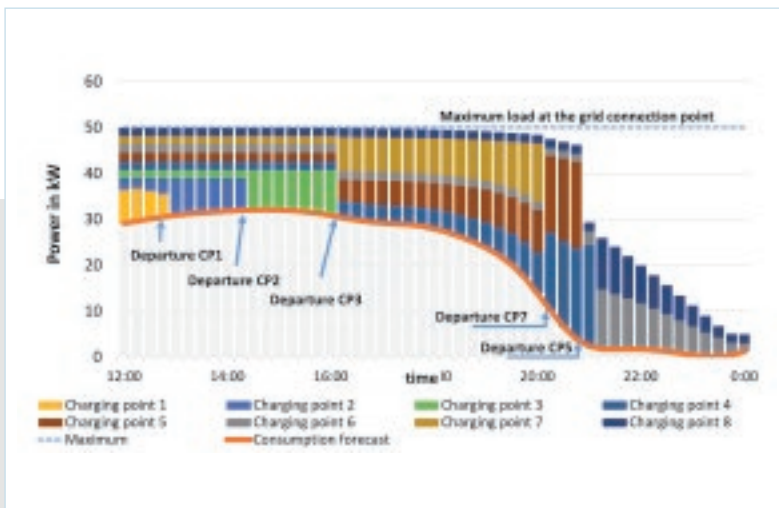
Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) sind ein Baustein auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Mobilität. Zusätzlich können BEV als mobile Speichereinheiten Mehrwerte für das Netz und den Energiemarkt liefern.

In dem vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhaben eLISA-BW wird die Ladeinfrastruktur am Sitz des Regierungspräsidiums Karlsruhe mit der dort angeschlossenen Fahrzeugflotte als flexible Verbrauchseinheit gesteuert. Auf Basis von geplanten Fahrten, die in einem Buchungssystem hinterlegt sind, werden optimierte Ladeprofile für die einzelnen Ladepunkte (CP1 bis CP8 in der Abbildung unten) ermittelt. Bei der Optimierung der Ladeprofile wird berücksichtigt, dass die Leistungsgrenze des Netzanschlusspunktes nicht überschritten werden darf. Eine Mindestleistung von 1,84 kW wird von Anfang an bereitgestellt, da sonst bei einigen Fahrzeugtypen der Ladevorgang abbricht. Die Restleistung bis zur maximalen Last am Netzanschlusspunkt wird entsprechend der gebuchten Fahrten verteilt. Dabei wird gewährleistet, dass die Flottenfahrzeuge rechtzeitig und ausreichend geladen sind, um die geplanten Fahrten mit möglichst wenig Ladebedarf außerhalb des Standorts durchführen zu können.

// Charging system management for fleet vehicles

Battery electric vehicles (BEV) are a building block on the way to more sustainable mobility. In their capacity as mobile storage units, BEVs can also provide added value for the grid and the energy market.

The charging infrastructure at the headquarters of the administrative authority in Karlsruhe (Regierungspräsidium Karlsruhe) is controlled in the eLISA-BW research project funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, with the vehicle fleet connected as a flexible consumption unit. Planned trips logged in a booking system are taken as the basis for working out optimum charging profiles for the individual charging points (CP1 to CP8 in the diagram below). When optimising the charging profiles, due account is taken of the fact that the power limit of the grid connection point must not be exceeded. A minimum output of 1.84 kW is provided right from the start, otherwise the charging process will be interrupted for some vehicle types. The remaining power up to the maximum load at the grid connection point is distributed according to the trips booked. This ensures that the fleet vehicles are sufficiently charged in time to be able to carry out the planned journeys and minimise any charging required en route.



// Vermeiden von Überlast am Netzanschlusspunkt durch Ladeplanung im Projekt eLISA-BW.
 // Avoidance of excessive load at grid connection points through the management of charging processes in the eLISA-BW project.

// Dennis Huschenhöfer
 E-mail: dennis.huschenhoefer@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-118

// Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)

Renewable Fuels and Processes (REG)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet REG erforscht die Erzeugung regenerativer Kraftstoffe im Kontext von Power-to-X (P2X) und die Realisierung geschlossener Stoffkreisläufe, z. B. mit Verfahren zum Phosphor-Recycling oder dem rohstofflichen Kunststoff-Recycling.

Mit unserem technischen Know-how entwickeln wir Technologiebausteine zur strombasierten Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen, die wir im technischen Maßstab umsetzen und erproben. Wir verfügen über eigene Elektrolyseblock- und Systemtechnologien im MW-Maßstab. Für Elektrolyseure entwickeln wir serientaugliche und skalierbare Materialien und Fertigungsmethoden. Unseren Kunden bieten wir Testmöglichkeiten sowohl im eigenen Labor als auch in Realumgebung, etwa an unserer Forschungsplattform am Power-to-Hydrogen-Standort in Grenzach-Wyhlen.

Ferner entwickeln wir für P2X-Prozesse Verfahren zur effizienten, regenerativen CO₂-Bereitstellung aus Luft oder von biogenen Reststoffen und verfügen über Expertise im Bereich P2X-Syntheseprozessen (Methan oder Methanol). Mit unserem Engineering- und System-Know-how haben wir bereits mehrere eigene Power-to-Gas- bzw. Elektrolyse-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 25 kW_{el} und 1 MW_{el} am ZSW errichtet. Wir beraten Industriekunden vom Basic-Engineering über die Inbetriebnahme kommerzieller Anlagen bis hin zum Technologie-Monitoring.

Darüber hinaus entwickeln wir innovative Verfahren im Kontext Circular Economy zur Reststoff-Verwertung und zum Rohstoff-Recycling. Wir erforschen Methoden zum Recycling von Phosphor bzw. zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoff-Abfällen.

// Our core areas of expertise

The REG department conducts research into the production of renewable fuels in the context of power-to-X systems (P2X) and into processes for phosphorus recycling or feedstock recycling, for example, with the wider aim of achieving closed loops.

We have the technical expertise to develop technology modules for the electricity-based production of hydrogen and synthetic fuels, and we are overseeing the roll-out and testing on an industrial scale. We have our own MW-scale electrolysis stack and electrolysis system technologies. We are developing reproducible and scalable materials and production methods for electrolyzers. We offer our customers test facilities both in our own laboratory and in real-world environments, such as the setting provided at our research platform at the power-to-hydrogen site in Grenzach-Wyhlen.

We are also developing methods for producing an efficient renewable supply of CO₂ from air or biogenic residues for P2X processes, and we have expertise in the field of P2X synthesis processes (methane or methanol). Our engineering and system know-how has already been invested in the establishment of several in-house power-to-gas and electrolysis plants at the ZSW, with output ranging between 25 kW_{el} and 1 MW_{el}. We advise industrial customers on issues ranging from basic engineering jobs and commissioning of commercial units right through to technical input in the monitoring of systems.

We are also developing innovative processes in the context of the circular economy for the reuse of waste materials and the recycling of resources. We are conducting research into ways of recycling phosphorus and recovering plastic waste for use as raw materials.



„Wir entwickeln anwendungsnahe Technologiebausteine im Kontext P2X und unterstützen unsere Industriekunden bei der Umsetzung.“

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

"We are developing technology modules for P2X applications and providing our industrial customers with support during their implementation."



// Serienproduktion von Elektrolyseblöcken

Das Forschungsprojekt „ElyFab-BW Plan“ fördert den Markthochlauf für Elektrolysetechnologien, indem es die industrielle Produktion von Elektrolyseblöcken vorbereitet. Am ZSW wird in Kooperation mit der Industrie ein umsetzungsnahes Fabriklayout als Basis für eine industrielle Fertigungslinie mit einem Volumen von 10 bis 20 Elektrolyseblöcken (5–10 MW_{el}) pro Tag erarbeitet. Die technologische Herausforderung liegt vor allem in der Fertigung von Komponenten und der präzisen, automatisierten Handhabung und Assemblierung von großen Bauteilen.

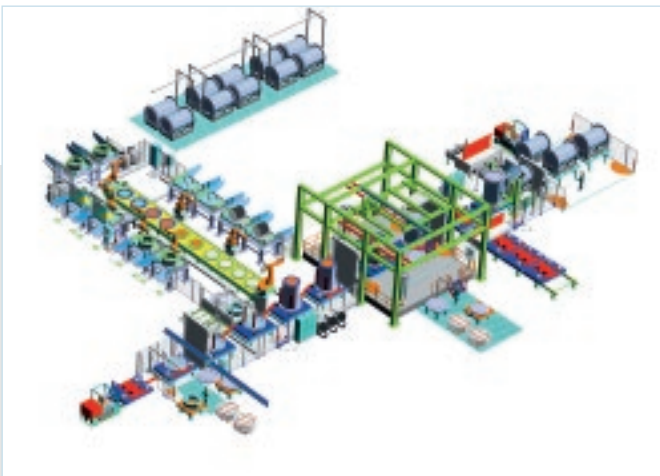
In Baden-Württemberg gibt es – unter anderem durch die Automobilindustrie – umfangreiche Produktions- und Handhabungstechnologien, die zur Serienfertigung von Elektrolyseblöcken genutzt werden können. Das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderte Projekt „ElyFab-BW Plan“ will diese Unternehmen dafür gewinnen, ihre Kompetenzen in die Wasserstoff-Technologie einzubringen, damit eine valide Basis für eine Fertigung von Elektrolyseuren in Baden-Württemberg geschaffen wird.

Für den Bau eines Elektrolyseblocks sind viele Fertigungsschritte notwendig, beginnend mit der Herstellung von Bauteilen aus Metall- und Kunststoffhalbleugen bis hin zur Endabnahme des montierten Elektrolyseblocks. Für das Fabriklayout wird ein bereits in Praxisumgebung validiertes ZSW-Elektrolyseblockkonzept genutzt (alkalische Druckelektrolyse, bis ca. 0,5 MW_{el} mit ca. 140 Zellen). Das Design wurde vom ZSW patentiert, dokumentiert und bietet damit eine gute Basis für die schnelle Industrialisierung und Skalierung der Technologie.

// Serial production of electrolysis stacks

The research project “ElyFab-BW Plan” is facilitating the route to market for electrolyser technology by paving the way for the production of electrolysis stacks on an industrial scale. Work is being done at the ZSW in cooperation with industry on the development of a functional factory layout as the basis for an industrial production line with an output of 10 to 20 electrolysis stacks per day (5 to 10 MW_{el}). The main challenges in terms of the technology lie in the manufacture of components and the precision automation for handling and assembly of large parts. Baden-Württemberg is home to an extensive production and application infrastructure – one branch being the automotive industry – which can be used for the serial production of electrolysis stacks. The “ElyFab-BW Plan” project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs is keen to attract the relevant companies with a view to investing their expertise in hydrogen technology and thereby establishing an effective basis for the production of electrolysers in Baden-Württemberg.

Many steps are necessary for the production of an electrolysis stack, starting with the manufacture of components from semi-finished metal and plastic products right through to the final inspection and acceptance of the assembled electrolysis stack. A ZSW design for an electrolysis stack has already been tested in practice and will be used for the factory layout (alkaline high-pressure electrolysis up to approximately 0.5 MW_{el} with about 140 cells). The design has been patented by the ZSW and the validation documentation offers a good basis for the rapid roll-out of the technology on an industrial scale.



// ElyFab-Fabriklayout für die Serienproduktion von Elektrolyseblöcken.
// ElyFab factory layout for series production of electrolysis stacks.

// Dr.-Ing. Ben Haugk
E-mail: ben.haugk@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-165



// Grüner Wasserstoff aus dem Reallabor

Im südbadischen Grenzach-Wyhlen ist die größte Power-to-Hydrogen-Anlage in Süddeutschland im Betrieb. Die Anlage befüllt bereits über 190 LKW-Ladungen mit brennstoffzellentauglichem Wasserstoff, der per Elektrolyse mithilfe von erneuerbarem Strom aus dem Wasserkraftwerk erzeugt wird. Das zukunftsweisende Projekt „Reallabor H₂-Wyhlen“ wird vom Bund gefördert. Das ZSW erforscht hier serientaugliche Elektrolysetechnologien – für eine industrielle Produktion von grünem Wasserstoff. Damit wird die Basis zur Hochskalierung der Technologie geschaffen: Die Kosten sinken und der Markt kann sich schneller in Richtung regenerative Energie entwickeln.

// FERTIGUNGSOPTIMIERUNG UND HOHE EFFIZIENZ

Die elektrische Leistung der Elektrolyse soll von 1 auf 6 Megawatt erweitert werden. Grüner Wasserstoff kann so die Sektoren Elektrizität, Wärmeversorgung, Mobilität und Industrie koppeln, was neue Geschäftsmodelle ermöglicht. Die Elektrolyse-Anlage erreicht am Standort hohe Volllaststunden, denn Wasserkraft ist vom Wetter unabhängig und steht immer zur Verfügung. Das sind wichtige Faktoren für eine wirtschaftliche Produktion von grünem Wasserstoff. Am ZSW werden die alkalische Elektrolyse-Technologie für eine industrielle Produktion zur Marktreife weiterentwickelt sowie die erforderlichen Materialien und Fertigungsprozesse für die Skalierung und Serienproduktion erforscht. Um die Effizienz bei der Produktion von grünem Wasserstoff zu steigern, werden beispielsweise galvanisch beschichtete Elektroden eingesetzt. Prototypen von Elektrolyseblöcken in der Leistungsklasse bis 0,5 MW_{el} sollen in der Forschungsanlage des ZSW in Realumgebung validiert werden.

// Green hydrogen from the real-world laboratory

The largest power-to-hydrogen plant in the south of Germany is in operation in Grenzach-Wyhlen in the south of Baden. The plant has already supplied over 190 truckloads of hydrogen which is suitable for fuel cells and is generated by electrolysis using renewable electricity from the hydroelectric power station. The forward-looking real-world laboratory project “Reallabor H₂-Wyhlen” is funded by the German government. The ZSW is conducting research here into electrolysis techniques suitable for series production – the prerequisite for the industrial production of green hydrogen. This will lay the foundations required to upscale the technology, causing a drop in costs and allowing the market to increase pace as it moves in the direction of renewable energy.

// PRODUCTION OPTIMISATION AND HIGH EFFICIENCY

The aim is to increase the electrical capacity of electrolysis from 1 to 6 megawatts. This will enable green hydrogen to link the electricity, heat supply, mobility and industry sectors, thereby enabling new business models. The electrolysis plant can achieve high full load hours at the site because hydroelectric power is independent of the weather and is always available. These are important factors for the economical production of green hydrogen. The alkaline electrolysis technology for industrial production will be developed to the point of commercial viability at the ZSW, with further research into the materials and manufacturing processes required for economies of scale and series production. An example of one approach being taken in a bid to increase efficiency in the production of green hydrogen is to use electroplated electrodes. Prototypes of electrolysis stacks with an output of 0.5 MW_{el} are to be tested in realistic conditions in the ZSW research facility.



// Wasserkraftwerk mit Power-to-Hydrogen-Anlage in Grenzach-Wyhlen.
// Hydroelectric power station with power-to-hydrogen plant in Grenzach-Wyhlen.

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



// Kohlendioxid und Wasser am laufenden Band

Kohlendioxid und Wasser sind zukunftsfähige Rohstoffe für Power-to-X-Prozesse zur Herstellung von eFuels. In dem Projekt „CORA“ wird am ZSW ein Verfahren zur parallelen Gewinnung von Kohlendioxid und Wasser aus Luft entwickelt. Und so funktioniert die innovative Verfahrenstechnik: CO₂ und Wasser aus der Atmosphäre werden mit einem Vlies aus Cellulosefasern und Aminen (organische Verbindungen) von der Luft abgetrennt und als Rohstoff aufbereitet. Die Elektrolyse sowie die Synthese in Power-to-X-Prozessen können so mit den erforderlichen Einsatzstoffen versorgt werden. Die Abtrennung aus der Luft ist vor allem für Standorte mit günstigen Wind- und PV-Bedingungen geeignet, an denen Power-to-X-Produkte (eFuels) im großen Stil hergestellt werden sollen.

// CELLULOSE-VLIAS ALS CO₂-SORBENS

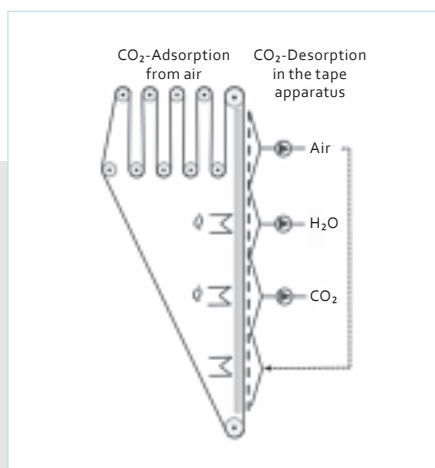
Mit dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Verbundprojekt „CORA“ soll sowohl der erforderliche elektrische Stromverbrauch auf Werte unter 0,5 elektrischen Kilowattstunden pro Kilogramm CO₂ als auch der Prozesswärmebedarf reduziert werden. Ziel ist die Entwicklung eines kostengünstigen CO₂-Sorbens auf Basis von Cellulose-Vlies und Aminen. Die Prozesstechnik ist die Grundlage für eine wettbewerbsfähige Industrialisierung und Skalierbarkeit der Technologie. Bis 2023 soll ein Demonstrator mit einer Produktionskapazität von ca. 10 t/a CO₂ am ZSW in Betrieb gehen. Die Möglichkeit einer parallelen CO₂- und H₂O-Bereitstellung prädestiniert das neue Verfahren zum geeigneten Rohstofflieferanten für Power-to-X-Prozesse. In „CORA“ wird auch die großtechnische Umsetzung und die industrielle Nutzung vorbereitet.

// Carbon dioxide and water on the conveyor belt

Carbon dioxide and water are sustainable raw materials for power-to-X processes for the production of e-fuels. A process for the parallel extraction of carbon dioxide and water from the air is being developed in the “CORA” project at the ZSW. The innovative technology works by taking CO₂ and water from the atmosphere and separating them from the air with a mat made of cellulose fibres and amines (organic compounds) and processing them as raw material. The input materials required for electrolysis and synthesis in power-to-X processes can be supplied in this way. The separation from the air is particularly suitable for locations with favourable wind and PV conditions where there are plans to make power-to-X products (e-fuels) on a grand scale.

// CELLULOSE FIBRE AS A CO₂ SORBENT

“CORA” is a joint project funded by the German Federal Ministry of Education and Research and is aimed at reducing both the electricity consumption to values below 0.5 kilowatt-hours per kilogramme of CO₂ and the process heat required. The brief is to develop a cost-effective CO₂ sorbent based on cellulose fibres and amines. The process is the foundation for competitive industrial practices and scalable technology. A demonstration system with a production capacity of around 1 kg of CO₂ per hour is to go into operation at the ZSW by 2023. The potential to provide CO₂ and H₂O in parallel makes the new system a suitable supplier of raw materials for power-to-X processes. Preparations are also being made in the “CORA” project for large-scale industrial roll-out and application.



// Im Bandapparat werden CO₂ und H₂O mithilfe von Prozessabwärme desorbiert und in konzentrierter Form bereitgestellt.

// Belt system for desorption of CO₂ and H₂O using process waste heat and subsequent provision in concentrated form.

// Dr. Ulrich Zuberbühler

E-mail: ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-239

// Akkumulatoren Materialforschung (ECM)

Accumulators Materials Research (ECM)

// Unsere Kernkompetenzen

Der traditionelle Schwerpunkt des Fachgebiets ECM liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren. Kernkompetenz ist die Entwicklung maßgeschneiderter Pulver und Pasten. Über 30 Jahre Materialforschung bilden die Basis für das umfangreiche Verständnis der Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien (z. B. Hochvoltspinnelle, Lithium-Übergangsmetallphosphate und -silikate) sowie Anodenmaterialien (z. B. optimierte Kohlenstoffmodifikationen, Titanate und Legierungsanoden) für Lithium-Ionen-Batterien wird intensiv an neuen Elektrolytsystemen mit speziellen Additiven geforscht. Die Arbeiten schließen auch Elektrodenmaterialien für zukünftige Systeme wie Lithium/Schwefel und Lithium/Luft ein.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Entwicklung von Batteriezellen in den Formaten 18650 und 21700 sowie Single-Layer- und gestapelten Pouchzellen. Hier stehen neue Fertigungsprozesse für leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Lithium-Zellgenerationen im Vordergrund. Zur Schadensanalyse und für die Bewertung neuer Zellen ist das Fachgebiet auf Post-mortem-Analysen spezialisiert. Sie sind essenziell für das Verständnis von Alterungsprozessen, potenziellen Sicherheitsrisiken sowie für die Optimierung des Zelldesigns.

ECM forscht außerdem an Post-Lithium-Speichern, u. a. mit Natrium, Magnesium oder Kalzium. Die Arbeiten erfolgen über das gemeinsam mit dem KIT und der Universität Ulm gegründete virtuelle Zentrum für zukünftige Energiespeicher CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe).

// Our core areas of expertise

The ECM department traditionally focuses in its work on the synthesis and characterisation of materials for batteries and supercapacitors which are geared to the functional specifications. The development of tailor-made powders and compounds is a key specialism. Having invested more than 30 years in research into materials, the foundations are in place for a broad understanding of the relation between powder structure and particle morphology in terms of delivering the desired functions and working properties. In addition to new cathode materials (e.g. high-voltage spinels, lithium transition metal phosphates and silicates) and anode materials (e.g. optimised carbon modifications, titanates and alloy anodes) for lithium-ion batteries, there is extensive research into new electrolyte systems with special additives. The research work also extends to electrode materials for future systems, such as lithium/sulphur and lithium/air.

Another focus is on the development of 18650 and 21700 battery cells and single-layer and stacked pouch cells. New manufacturing processes for performance-enhanced components for future lithium cell generations are a primary concern. The department specialises in 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.

ECM is also conducting research into post-lithium storage solutions, including systems based on sodium, magnesium and calcium. The work is carried out through CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe), a virtual centre for future energy storage systems which was founded jointly with the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and Ulm University.



„Die E-Mobilität wird die Zulieferindustrie für die Automobilwirtschaft grundlegend verändern. Wir müssen alles daransetzen, um die Entwicklung und Produktion von Batteriesystemen zügig voranzutreiben – und damit die Zukunftsfähigkeit unserer Industrie in Deutschland zu sichern.“

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

"E-mobility is going to completely transform the automotive supply industry. We must undertake every effort to accelerate the development and production of battery systems – and in doing so, ensure our future viability in German industry."



// Weiterentwicklung von Li-Ionen-Zellen im 21700-Format

In dem von der Europäischen Union geförderten Vorhaben TEESMAT forscht das ZSW gemeinsam mit 19 Partnern aus zehn Ländern an neuen Methoden zur Charakterisierung von Energiespeichermaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. Ziel des Vorhabens ist die Demonstration von neuen oder weiterentwickelten Methoden aus den Bereichen Alterung, Sicherheit, Performance und Produktion. Die Methoden werden anhand aktueller Fragestellungen der beteiligten Industriepartner demonstriert.

Am ZSW wurden bisher in TEESMAT sechs Methoden zur Charakterisierung von Batteriematerialien erarbeitet. Darunter befinden sich Operando-Methoden für direkte Einblicke während des Lade-/Entladevorgangs oder des Thermal Runaways von Batteriezellen sowie Analysemethoden zur Materialcharakterisierung aus Post-mortem-Analysen. Ein Beispiel ist die Glimmentladungsspektroskopie (GD-OES), die es erlaubt, Tiefenprofile der Elementverteilung von der Anodenoberfläche bis zur Kupferfolie zu bestimmen. Mit dieser am ZSW entwickelten Methode wurde gezeigt, dass sich Kupfer während der Tiefentladung vor allem auf der Anodenoberfläche wieder abscheidet (s. Abb. unten).

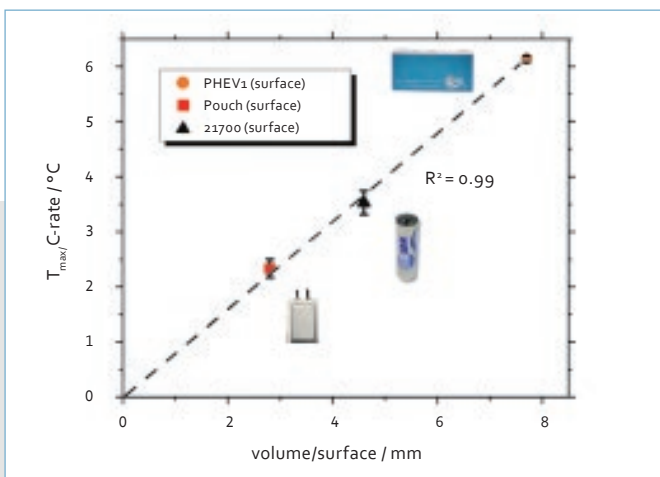
Mit dem Projekt TEESMAT soll die europäische Industrie bei der Batterieentwicklung durch innovative In-line-, Operando-, In-situ- und Ex-situ-Charakterisierungsmethoden unterstützt werden.

// Further development of Li-ion cells in 21700 format

The ZSW is working with 19 partners from 10 countries on research into new ways of characterising energy storage materials for lithium-ion batteries in the TEESMAT project which is funded by the European Union. The aim of the project is to demonstrate new or improved methods in relation to ageing, safety, performance and production. The methods will be demonstrated with reference to current issues faced by the industrial partners involved.

Six approaches to the characterisation of battery materials have been developed at the ZSW so far in the TEESMAT project. These include in-operando methods, allowing direct insights during the charging/discharging process and during thermal runaway in battery cells, and analytical methods for material characterisation from post-mortem analyses. One example is glow discharge optical emission spectroscopy (GD-OES) which allows the definition of depth profiles of the elemental distribution from the anode surface right through to the copper foil. This method was developed at the ZSW and has been used to show that copper deposits mainly form again on the anode surface during deep discharge processes (see diagram below).

The TEESMAT project is intended to facilitate battery development in European industry by means of innovative in-line, in-operando, in-situ and ex-situ characterisation methods.



// Aufheizverhalten von Pouch-, 21700-, und PHEV1-Zellen als Funktion des Verhältnisses von Zellvolumen zu Zelloberfläche, Quelle: T. Waldmann et al., J. Electrochem. Soc. 168 (2021) 090519, <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ac208c>
 // Heating properties of pouch cells, 21700 cells and PHEV1 cells as a function of the ratio of cell volume to cell surface. Source: T. Waldmann et al., J. Electrochem. Soc. 168 (2021) 090519, <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ac208c>

// Dr. Thomas Waldmann

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

Phone: +49 731 9530-212

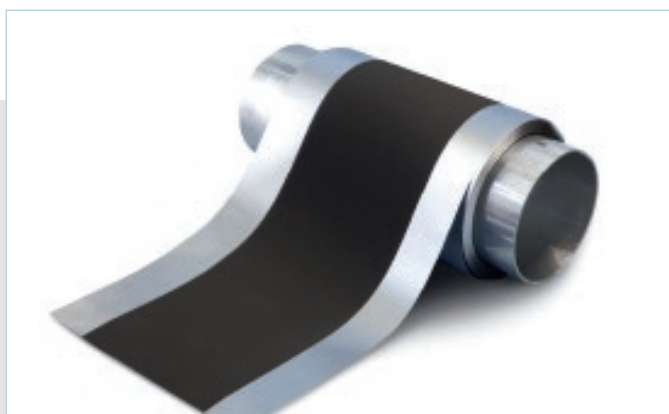


// Alternative, nachhaltige Elektrodenfertigung

Positive Elektroden von Lithium-Ionen-Batterien werden in der Regel mit N-Methylpyrrolidon (NMP) als Prozesslösungsmittel und Polyvinylidenfluorid (PVDF) als Binder hergestellt. Diese Komponenten ermöglichen die Herstellung mechanisch stabiler und elektrochemisch gut funktionierender Elektroden im großen Maßstab. Allerdings sind sowohl NMP als auch PVDF recht kostspielig. NMP ist darüber hinaus sehr toxisch und teratogen und muss bei der Elektrodenproduktion vollständig zurückgewonnen werden, was hohe Prozesskosten verursacht. Der Ersatz von PVDF durch wasserlösliche Binder, wie sie industriell in der Fertigung von negativen Elektroden eingesetzt werden, ist daher ein aktuelles Entwicklungsthema.

Die Verwendung von nickelreichen Kathodenmaterialien ist Industriestandard. Mit höherem Nickelgehalt steigt jedoch die Sensitivität gegenüber Feuchtigkeit, was zu Kapazitätsverlusten und mangelnder Langzeitstabilität führt. Ein weiteres Problem ist die Korrosion des Aluminiumableiters als Folge des hohen pH-Werts der wässrigen Dispersionen mit nickelreichen Kathodenmaterialien. Dies stellt große Herausforderungen an die Entwicklung wasserbasierter Kathodenherstellverfahren.

Durch ein systematisches Binderscreening und gezielte Prozessführung mit pH-Kontrolle während der Pastenherstellung und Elektrodenbeschichtung gelang die wasserbasierte Herstellung nickelreicher Kathodenelektroden mit sehr guter elektrochemischer Performance und exzellenter Zyklenlebensdauer. Die Untersuchungen zeigten, dass die Leistung stark von der individuellen Kombination der Bindemittel abhängt. Die optimierten Laborergebnisse konnten inzwischen erfolgreich in den Technikumsmaßstab zur Herstellung doppelseitig beschichteter Kathodenbänder im 100-m-Maßstab übertragen werden.



// Alternative sustainable electrode production

Positive electrodes for lithium-ion batteries are typically manufactured using N-methylpyrrolidone (NMP) as the process solvent and polyvinylidene fluoride (PVDF) as the binder. These components enable the large-scale production of mechanically stable electrodes which function well in electrochemical terms. It is the case, however, that both NMP and PVDF are quite expensive. What is more, NMP is very toxic and teratogenic and must be completely recovered during electrode production, thereby incurring high process costs. The replacement of PVDF by water-soluble binders of the kind used industrially in the production of negative electrodes, is therefore currently on the development agenda.

The use of nickel-rich cathode materials is the industry standard. A higher nickel content causes an increase in sensitivity to moisture, however, which leads to capacity losses and a lack of long-term stability. Another problem is the corrosion of the aluminium conductor as a result of the high pH of the aqueous dispersions with nickel-rich cathode materials. This poses major challenges for the development of water-based cathode manufacturing processes.

Systematic binder screening and pH control during the paste production and electrode coating processes enabled the water-based production of nickel-rich cathode electrodes with very good electrochemical performance and excellent cycle life. The tests showed that the performance is heavily dependent on the combination of the binders in any given case. Having been optimised, the laboratory results were successfully transferred to the pilot plant for production of cathode strips coated on both sides on a 100 m scale.

// Vom ZSW im 100-m-Maßstab wasserbasiert hergestellte nickelreiche Kathode mit sehr guter elektrochemischer Performance und exzellenter Zyklenlebensdauer.
 // Nickel-rich cathode produced by the ZSW in a water-based process on a 100 m scale with very good electrochemical performance and excellent cycle life.

// Dr. Rares Scurtu

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

Phone: +49 731 9530-545



// Recycling von Aktivmaterial aus End-of-Life-Batterien

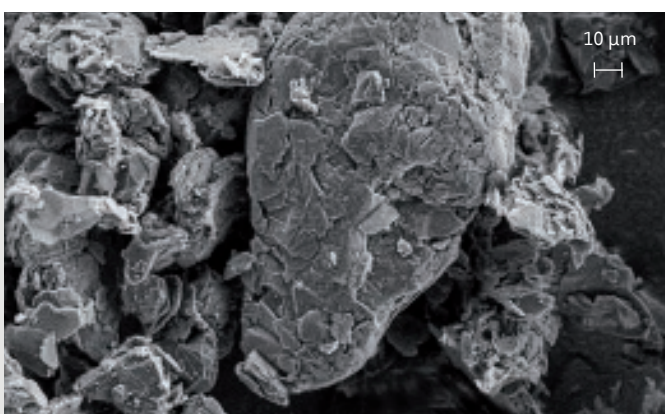
Um die Anforderungen an die Verringerung der Umweltauswirkungen zu erfüllen und um die Rohstoffversorgung in der EU für die Produktion von Batterien sicherzustellen, spielt das Recycling von Batterien eine entscheidende Rolle. Batteriematerialien wie Kobalt, Grafit und Lithium werden von der Europäischen Union aufgrund ihrer geopolitischen Verteilung als kritische Rohstoffe eingestuft. Eine hohe Recyclingquote von Lithium-Ionen-Batterien kann somit wesentlich zu Material- und Energieeinsparungen bei der Produktion neuer Lithium-Ionen-Batterien beitragen.

Das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderte Projekt RecycleMat zielt auf eine Machbarkeitsstudie zum direkten Recycling ab. Im Gegensatz zu herkömmlichen Verfahren werden die Aktivmaterialien nicht in ihre Metalle zerlegt, sondern gesammelt, gereinigt und direkt in neuen Batterien wiederverwendet. Verfahren für die Trennung der Anoden- und Kathodenmassen aus End-of-Life-Batterien wurden erfolgreich entwickelt. Die Arbeiten konzentrierten sich auf das Recycling von Anodenmassen. Im Rahmen des Projekts wurde eine Reihe verschiedener Methoden eingesetzt, um die Auswirkungen von Alterungseffekten auf das Anodenmaterial zu analysieren und effiziente Behandlungsstrategien zu entwickeln. Dabei stellt die Reinigung des Graphits eine der größten Herausforderungen für direkte Recyclingkonzepte dar. Zurückgewonnene Pulver werden einem Rundungsverfahren und einer thermischen Nachbehandlung unterzogen, die sowohl die Oberfläche der Partikel von Verunreinigungen befreit als auch bei höheren Temperaturen die kristalline Struktur wiederherstellt. In der Folge werden so recycelte Kohlenstoffe neuen Anoden beigemischt und in Vollzellen elektrochemisch evaluiert.

// Recycling of active materials from end-of-life batteries

The recycling of batteries is key to meeting the reductions required to minimise the environmental impact and to ensuring the supply of raw materials in the EU for the production of batteries. Battery materials like cobalt, graphite and lithium are classified by the European Union as critical raw materials due to their geopolitical distribution. A high recycling rate of lithium-ion batteries can make a significant difference when it comes to saving materials and energy in the production of new lithium-ion batteries.

The aim of the RecycleMat project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, is to conduct a feasibility study on direct recycling. In contrast to conventional processes, the active materials are not broken down into their metals. Instead they are collected, cleaned and reused in new batteries. Processes have been developed for separating the anode and cathode masses from end-of-life batteries. The work focused on the recycling of anode masses. A number of different methods were used in the project to analyse the effects of ageing on the anode material and to develop efficient treatment strategies. The process of cleaning the graphite is in fact one of the biggest challenges for direct recycling systems. Recovered powders are subjected to a rounding process and thermal finishing treatment which removes impurities from the surface of the particles and also restores the crystalline structure at higher temperatures. The carbons which have been recycled in this way are added to new anodes and undergo 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.

// Dr. Marilena Mancini

E-mail: marilena.mancini@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-403

// Produktionsforschung (ECP)

Production Research (ECP)

// Unsere Kernkompetenzen

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

Der Schwerpunkt des Fachgebiets liegt in der Weiterentwicklung von Herstellprozessen zur seriennahen Produktion von Batteriezellen. Hierfür betreibt das Fachgebiet seit sieben Jahren eine europaweit einmalige „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen“ (FPL). Im Zentrum stehen Untersuchungen zum Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten sowie Fragen zu Inline-Sensorik, zu Fertigungstoleranzen oder zu kosteneffizienten Abläufen. Bei neuen Materialien und Komponenten sind es Fragen zur Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität – im industrierelevanten Maßstab.

Das ECP-Team besteht aus einer guten Mischung aus erfahrenen, hochqualifizierten Technikerinnen und Technikern, Ingenieurinnen und Ingenieuren sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, deren Kernaufgabe es ist, im Rahmen von Industrieaufträgen und Forschungsvorhaben industrielle Produktionsprozesse zu optimieren oder fortschrittliche Zellchemie in Mustersonden von Standardzellen zu verifizieren. Die Forschungskompetenz umfasst alle produktionsnahen Fragestellungen, von der Entwicklung ganzer Anlagen über die Verbesserung von Einzelprozessen bis zu Qualitätssicherungsverfahren. Mit den vielfältigen Produktionsanlagen und den umfangreichen Erfahrungen des Fachgebiets wurde die FPL zum integralen Bestandteil im Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ des Bundesforschungsministeriums. Diese Anerkennung belegt die Exzellenz der Batterieforschung am ZSW.

// Our core areas of expertise

The serial production of large lithium-ion cells like 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 is on the further development of manufacturing processes for the pre-series production of battery cells. For the last seven 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 investigations into the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in relation to quality, safety and manufacturing costs, seeking to answer questions about in-line sensors, production tolerances and cost-efficient processes. When it comes to new materials and components, there are questions about the evaluation of processability and quality – on an industrial scale.

The ECP team consists of a good mix of experienced and highly qualified 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 and the experience gathered in the department, the FPL has become an integral part of the “Battery Cell Research Factory” (“Forschungsfabrik Batteriezelle” - FFB) umbrella strategy adopted by the German Federal Ministry of Education and Research. This demonstrates a recognition of excellence in battery research at the ZSW.



„Mit der Forschungsproduktionslinie stellen wir unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft eine flexible, prozesssichere 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

“With the research production line, we can offer our partners from industry and research a flexible and reliable test environment for joint battery cell production projects.”



// Recycling von Elektrodenabfällen aus der Produktion

Die Entwicklung innovativer Recyclingtechnologien sowie energie- und materialeffizienter Batterielebenszyklen mit geschlossenen Materialkreisläufen ist wesentlich für eine klimaneutrale Zukunft. Essenzielle Materialien für die Batterieproduktion, wie Kobalt und Naturgraphit, sind nur begrenzt auf der Welt verfügbar und weisen damit ein hohes Versorgungsrisiko auf. Von der Europäischen Kommission sind sie als kritische Rohstoffe eingestuft.

Aktuell werden die wenigen Lithium-Ionen-Batterien, die zum Recycling kommen, in bestehende Anlagen zur Buntmetallrückgewinnung gegeben. Um künftige Lieferengpässe zu vermeiden, sind Batterieschrott und Produktionsausschüsse als wertvolle Sekundärquelle für kritische Materialien in den Fokus gerückt. Zudem besteht die Möglichkeit, über Rückgewinnung von Materialien die CO₂-Bilanz der Batterieproduktion positiv zu beeinflussen, da energieintensive Abbauprozesse von Rohstoffen vermindert werden können.

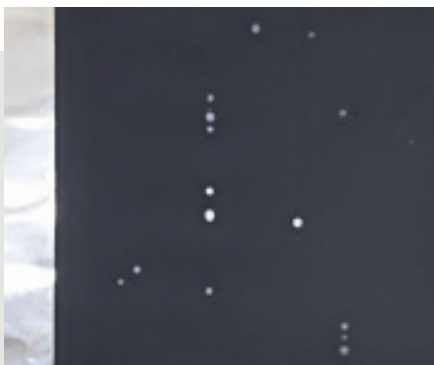
In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „Action“ erforscht das ZSW die Rückführung von Elektrodenausschüssen (Einfahrmaterial, Halbzeuge mit Beschichtungsdefekten, Elektrodenverschnitte etc.). Hierfür wird der Einsatz von bestehenden und neu zu entwickelnden Verfahren untersucht. Elektrodenausschüsse sind im Vergleich zu Batterieschrott vorteilhaft, da Anode und Kathode sortenrein vorliegen. Der Schwerpunkt liegt insbesondere auf der industrienahen Produktion und Charakterisierung von Elektrodenpasten, Elektrodenbändern und Batteriezellen, welche anteilig Recyclat enthalten.

// Recycling of electrode rejects from production processes

The development of innovative recycling technologies and energy-efficient battery life cycles boasting an effective use of resources in a circular economy is essential for a climate-neutral future. Materials which are essential for battery production, such as cobalt and natural graphite, are subject to limited availability worldwide and are therefore very vulnerable to supply risks. They are classified as critical raw materials by the European Commission.

The few lithium-ion batteries which are recycled at present are sent to existing plants for non-ferrous metal recovery. Scrap batteries and production rejects have been identified as valuable secondary sources of critical materials with a view to avoiding future supply shortages. It might also be possible to have a positive influence on the carbon footprint of battery production through the reclamation of materials, given the potential reduction in energy-intensive processes for the mining of raw materials.

In the “Action” project funded by the German Federal Ministry of Education and Research, the ZSW is conducting research into the recovery of electrode rejects (running-in materials, semi-finished products with coating defects, electrode scrap, etc.), using both existing methods and processes yet to be developed. The advantage of electrode rejects over scrap batteries is that the anode and cathode are still separate. 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.

// Dr. Miriam Keppeler
E-mail: miriam.keppeler@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-559

// Akkumulatoren (ECA)

Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECA betreibt das Batterietestfeld am ZSW und untersucht elektrochemische Energiespeichersysteme bis 1.000 V und 360 kW. Akkumulatoren sollen auch unter schwierigsten Bedingungen leistungsfähig und sicher sein. Daher steht deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen und die Untersuchung des Verhaltens im Fehlerfall oder in Unfallsituationen 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.

Im Team der elektrischen 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 sowie deren Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen beurteilt. Schwerpunkte bilden dabei die Unterdrückung der Fehlerausbreitung im System (thermische Propagation) und die Brandlöschung.

Herzstück des Teams Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Simulation von Zellen und Batteriesystemen inklusive von Algorithmen für den Batteriezustand und das Batteriemangement. Erforscht werden weiterhin die optimale Laderegulierung unter Schnellladebedingungen, der Einfluss von Rippelströmen sowie von mechanischen Kompressionskräften auf die Performance, die zu erwartende Lebensdauer und die Sicherheit.

// Our core areas of expertise

The ECA department operates the battery test site at the ZSW and conducts research into electrochemical energy storage systems up to 1,000 V and 360 kW. Accumulators should be efficient and safe even when subject to the toughest conditions. The work therefore focuses on investigating their behaviour under different operating conditions and their 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 team carries 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 and their resistance to various situations of misuse. Focal points in this work include the suppression of thermal propagation in the system and the extinguishing of fires.

The battery system technology team is mainly concerned with the thermal and electrical simulation of cells and battery systems, including algorithms for battery condition and battery management. Other areas of research include the optimum control under rapid charging conditions, the influence of ripple currents and mechanical compression forces on performance, the expected service life and safety.



„Im vergangenen Jahr haben wir im Fachgebiet ECA in einem unsicheren Marktumfeld für verlässliche Testergebnisse und solide Forschungsergebnisse gearbeitet. Für das entgegengebrachte Vertrauen unserer Kunden möchten wir uns ausdrücklich bedanken.“

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

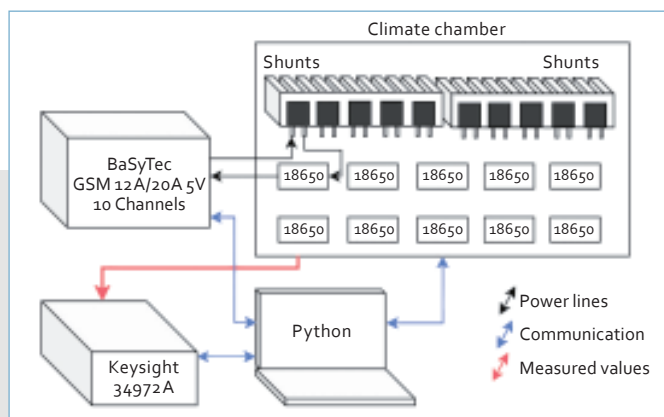
"Here in the ECA department we have worked in an uncertain market climate in the past year, striving for reliable test results and solid research outcomes. We would like to thank our customers most sincerely for the trust they have placed in us."



// Forschung zur Batteriesicherheit und -alterung intensiviert

Neben dem Tagesgeschäft im Bereich von Zell-, Modul- und Batterietests war das Jahr 2021 geprägt von der Durchführung einer Reihe von öffentlich geförderten Projekten. Beispielsweise sind wir im Rahmen des Dachkonzepts Forschungsfabrik Batteriezelle (FFB) des Bundesforschungsministeriums im Kompetenzcluster Batterienutzungskonzepte (BNK) mit den zwei Projekten „Neuartige Untersuchungsmethoden zur Batteriesicherheit“ (NUBase) und „Beschleunigte Alterungstests und Lebensdauerprognosen“ (BALd) beteiligt. Neben der Projektleitung arbeitet das ZSW im NUBase-Projekt an der Entwicklung von biologisch basierten Barrieren, die in Energiespeichern die Propagation des Thermal Runaways zwischen Lithium-Ionen-Zellen bis zu einer Kapazität von 60 Ah unterdrücken können. Das ZSW ist davon überzeugt, dass die Batteriesicherheit, insbesondere in großen Energiespeichern, durch die Anwendung von Propagationsschutzbarrieren eine wesentliche Verbesserung erfahren kann. Im Projekt BALd geht es um die Entwicklung klar definierter Prozeduren für die Durchführung von Schnelltests zur Lebensdauerabschätzung. Dazu werden die Methoden der Hochpräzisions-Coulombmetrie (HPC), der Differentialspannungsanalyse (DVA für differential voltage analysis) und der Dilatometrie angewandt.

Des Weiteren wird in dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten EXIST-Projekt „Endothermic Safety Concept“ (ESCO) die Kommerzialisierung der industriellen Herstellung von Propagationsschutzbarrieren für die Großserie vorbereitet. Dabei stehen der Aufbau einer Pilotfertigung zur Herstellung von Propagationsschutzbarrieren und die Entwicklung der Prozessschritte zur Anpassung der Barrieren an individuelle Kundenbedürfnisse im Mittelpunkt.



// Research stepped up into battery safety and battery ageing

The routine tests on cells, modules and batteries continued as usual in 2021 with an added focus on a number of publicly funded projects. We are involved in projects in connection with the Battery Cell Research Factory (Forschungsfabrik Batteriezelle - FFB) umbrella strategy adopted by the German Federal Ministry of Education and Research in the Competence Cluster for Battery Utilisation Concepts (Kompetenzcluster Batterienutzungskonzepte - BNK). Two examples of such projects are "Novel investigation methods for battery safety" ("Neuartige Untersuchungsmethoden zur Batteriesicherheit" - NUBase) and "Accelerated stress tests and lifetime predictions" ("Beschleunigte Alterungstests und Lebensdauerprognosen" - BALd). In addition to the management in the NUBase project, the ZSW is working on the development of biological barriers which can suppress the propagation of thermal runaway between lithium-ion cells in energy storage devices up to a capacity of 60 Ah. We are convinced that battery safety, especially in large energy storage systems, can be significantly improved by the use of anti-propagation barriers. Our aim in the BALd project is to develop clearly defined procedures for rapid tests for the estimation of service life. High-precision coulombmetry (HPC), differential voltage analysis (DVA) and dilatometry are the methods used to this end.

We are also making preparations for the commercial stage of the industrial production of anti-propagation barriers in large volumes in the EXIST project "Endothermic Safety Concept" (ESCO) funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs. Our attention in this project is focused on setting up a pilot production facility for anti-propagation protection barriers and on developing the steps involved in the process of customising the barriers to individual requirements.

// Schematischer Aufbau eines hochgenauen Coulombmetrie-Teststands für das Projekt BALd.

// Diagram showing the configuration of a high-precision coulombmetry test rig for the BALd project.

// Dr. Marius Bauer

E-mail: marius.bauer@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-588

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

// Unsere Kernkompetenzen

Grundlegende Perspektiven zur Energieversorgung und für den Verkehr eröffnet die Energiespeicherung über Wasserstoff, Brennstoffzellen und Akkumulatoren mit wässrigen Elektrolyten. Der Fokus des Fachgebiets ECG liegt auf Analysen zum Einfluss von Zusammensetzung und Mikrostruktur auf die Leistungscharakteristik und Lebensdauer von Elektroden und Zellen.

Einen weiteren Schwerpunkt bilden Arbeiten zum Korrosionsverhalten metallischer Materialien unter Einsatzbedingungen. Ziel dieser Untersuchungen sind die Steigerung von Leistungsdichte und Lebensdauer sowie die Kostenreduktion. Experimentelle Arbeiten erfolgen schwerpunktmäßig an Modellelektroden und Modellzellen, unterstützt durch mathematische Modellierung und Simulation. Die Verifikation dieser Ergebnisse findet über Tests in großformatigen Zellen und Stacks statt – in Kooperation mit anderen ZSW-Fachgebieten. Zur detaillierten Bestimmung der Elektrodenmikrostrukturen von Brennstoffzellen und Batterien, sowohl im Neuzustand als auch im Verlauf der Betriebsdauer, kommen die hochauflösende Bildgebung über Elektronenmikroskopie sowie tomografische Methoden zum Einsatz.

Das Fachgebiet ECG verfügt über langjährige Erfahrung und die nötige Infrastruktur, völlig neue technologische Ansätze aufzugreifen und im Labor zu verifizieren und demonstrieren. Durch die konsequente Optimierung der Material- und Elektrodenzusammensetzung sowie der Elektrodenmikrostrukturen ist es beispielsweise gelungen, die Leistungscharakteristik von Membran-Elektroden-einheiten (MEAs) für Polymerelektrolytmembranbrennstoffzellen (PEMFC) bei hohen Stromdichten zu steigern. Röntgen-, Synchrotron- und Neutronentomografie erlauben In-operando-Einblicke während des Betriebs von Batterie-, Elektrolyse- und Brennstoffzellen. Durch Prüfung des Betriebsverhaltens auf Systemebene schaffen wir zusätzlich wertvolle Erkenntnisse zur Übertragung der Modellstudien auf Elektrolyseure, Batterien und Brennstoffzellen im praktischen Einsatz.

// Our core areas of expertise

The use of hydrogen, fuel cells and accumulators with aqueous electrolytes for the storage of energy raises the prospect of fundamental advantages for energy supply and transport. The ECG department focuses on analysing the influence of composition and microstructure on the performance characteristics and service life of electrodes and cells.

Another focal point is studying the corrosion behaviour of metallic materials in operating conditions. The aims of these investigations are to increase power density, lengthen service life and reduce costs. Experiments are mainly carried out on model electrodes and model cells with the added support of mathematical modelling and simulation. The results are verified in tests in large-sized cells and stacks in cooperation with other ZSW departments. High-resolution imaging methods using electron microscopes and tomography are applied in order to gain detailed knowledge of the electrode microstructures of fuel cells and batteries, both when new and in the course of their service life.

The ECG department has many years of experience and the necessary infrastructure to adopt completely new approaches and to verify and demonstrate the technologies in the laboratory. It has been possible, for example, through consistent optimisation of the material composition, electrode composition and electrode microstructures, to improve the performance characteristics of membrane electrode assemblies (MEAs) for polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) at high current densities. X-ray, synchrotron and neutron tomography allow in-operando insights into battery cells, electrolysis cells and fuel cells. By examining the operating behaviour at system level, we also generate valuable knowledge for the transfer of the modelling studies to electrolyzers, batteries and fuel cells in actual practice.



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

"We research and develop 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



©Powercell.

Hydrogen fuel cell cruise aircraft APUS i-2



// Anpassung eines Brennstoffzellen-systems für den Luftverkehr

Die Mobilität und somit auch der Luftverkehr verursachen einen großen CO₂-Fußabdruck. Um diesen zukünftig deutlich verkleinern zu können, stellen elektrische Antriebe eine CO₂-freie Lösung dar. Im Rahmen des Projektes Avicell unterstützt das ZSW einen Flugzeughersteller bei der Entwicklung eines emissionsfreien, elektrisch angetriebenen zweimotorigen Flugzeugs. Das Flugzeug soll Platz für bis zu drei Passagiere bieten. Zur Energieversorgung wird ein wasserstoffbetriebenes Brennstoffzellensystem eingesetzt.

Im vom ZSW bearbeiteten Teilprojektziel steht die Überprüfung der Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit eines für den Flugbetrieb geeigneten Brennstoffzellensystems im Zentrum der Untersuchungen. Hierzu wurde ein kommerzielles Standardbrennstoffzellensystem (vgl. Abb. oben) mit einer Nennleistung von 100 Kilowatt bzw. maximal 125 Kilowatt elektrischer Leistung beschafft, erfolgreich in Betrieb genommen und im Hinblick auf die Leistungscharakteristik getestet.

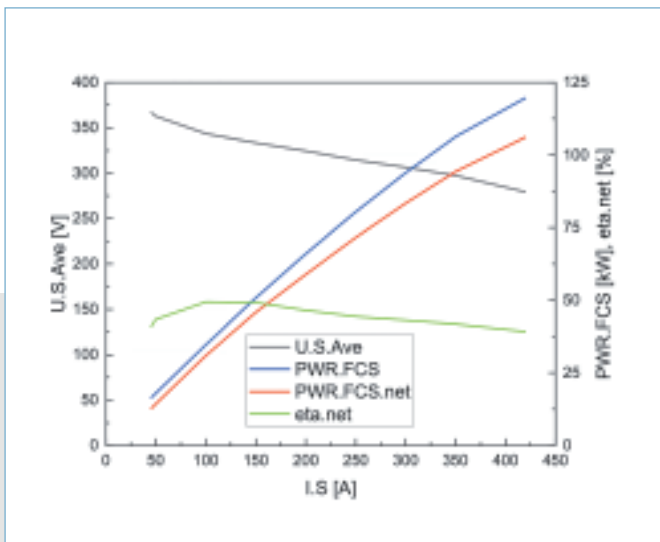
Mit dem System konnte die spezifizierte Leistung erreicht (s. Abb. unten) und mit simulierten Lastprofilen erfolgreich betrieben werden. Die Aktivitäten haben wichtige Erkenntnisse über die Funktionsweise und die Systemdynamik geliefert. Das ZSW leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Integration von Brennstoffzellensystemen für Luftfahrtanwendungen.

// Adaptation of a fuel cell system for aviation

Mobility and therefore air travel produce a large carbon footprint. Electric drives constitute a CO₂-free solution in moves to bring about a significant reduction in this in the future. The ZSW is working with an aircraft manufacturer in the Avicell project on the development of an emission-free, twin-engine aircraft powered by electricity. The aeroplane will seat up to three passengers. A hydrogen-powered fuel cell system will be used to supply the energy.

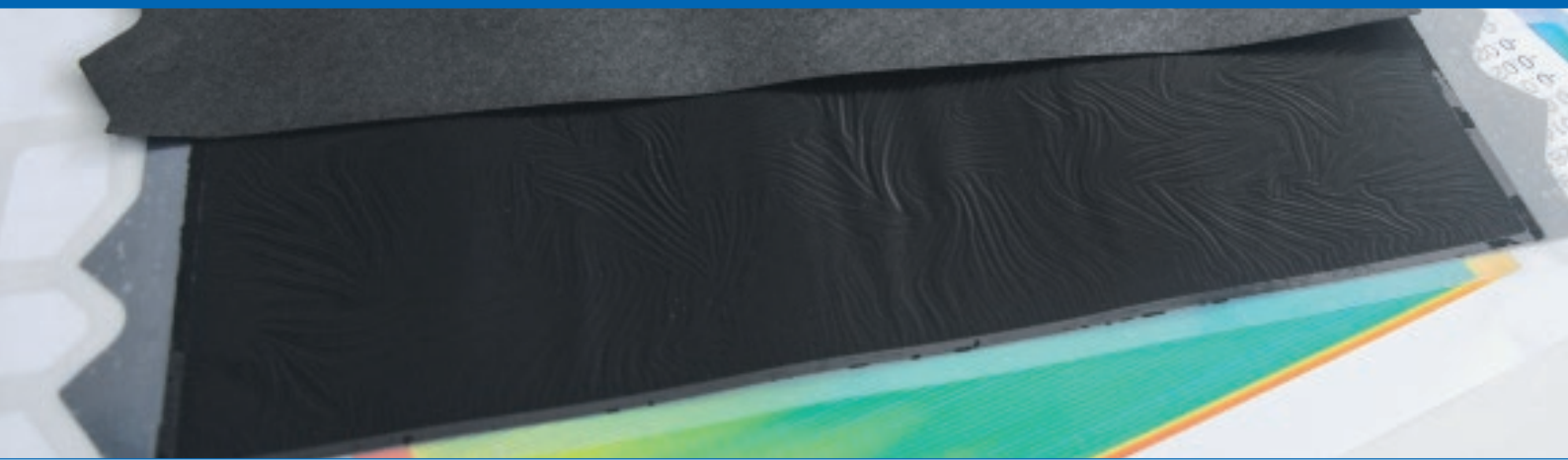
The project brief for the ZSW in its specific assignment is to examine the reliability and efficiency of a fuel cell system suitable for air traffic. A standard commercial fuel cell system with a rated power output of 100 kilowatts or a maximum of 125 kilowatts was therefore procured (photo above), successfully put into operation and tested with a view to assessing the performance characteristics.

The specification was met by the system (see diagram below), and operation with simulated mission profiles was successful. The studies have provided key insights into the way the system works and its dynamic range. The ZSW is therefore making an important contribution to the integration of fuel cell systems for applications in aviation.



// Die Kennlinien des kommerziellen Brennstoffzellensystems zeigen, dass ein Einsatz im Flugverkehr realisierbar ist.
 // The characteristic curves of the commercial fuel cell system show that it can be used in air traffic.

// Jan-Peter Boye
 E-mail: jan-peter.boy@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-822



// Entwicklung innovativer Brennstoffzellenelektroden

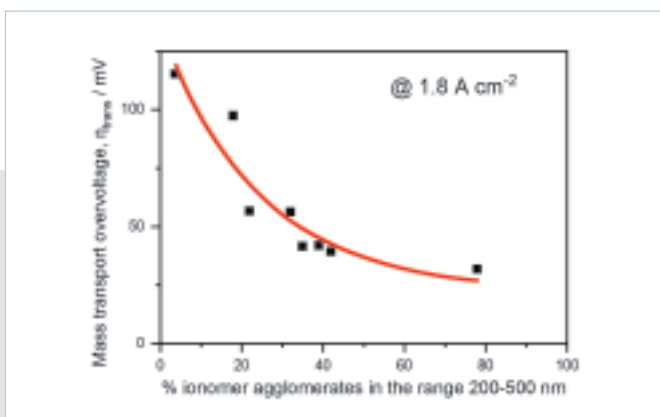
Ziel des deutsch-französischen Kooperationsprojekts BRIDGE (Bridging the environmental Gap: promising catalyst materials to performant fuel cells Electrode) ist es, die Leistungscharakteristik von Brennstoffzellen bei hohen Stromdichten durch innovative Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) zu steigern. Ein Ansatz hierzu ist die Minimierung der Stofftransportverluste in der Katalysatorschicht bei hohen Stromdichten, die maßgeblich von der Wechselwirkung von Elektrodenmikrostruktur und Versorgung der Sauerstoffelektrode beeinflusst wird. Die Voraussetzung für Optimierungen liegt in der optimalen Strukturierung und Ausnutzung der Edelmetallkatalysatoren.

Hierzu untersuchen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Zusammensetzung der Tinten zur Herstellung der Elektroden bzw. Katalysatorschichten. Solche Katalysator-tinten werden durch Besprühen der Elektrolytmembran mit einer Tinte aus Katalysatorpartikeln und einer Ionomerdispersion hergestellt. Dabei hat die Zusammensetzung des Dispergierungsmittels einen entscheidenden Einfluss auf die Größenverteilung der Ionomere der Katalysator-tinte. Durch Variation der Zusammensetzung des aus Wasser und verschiedenen Alkoholen bestehenden Dispergierungsmittels konnten die Stofftransporteigenschaften der Elektroden über die Ionomeragglomerat-Größenverteilung gezielt gesteuert werden. Als besonders bedeutsam zur Minimierung der Stofftransportverluste hat sich der Anteil an Ionomeragglomeraten im Größenbereich von 200–500 nm erwiesen.

// Development of innovative fuel cell electrodes

The aim of the Franco-German project BRIDGE (Bridging the environmental Gap: promising catalyst materials to performant fuel cells Electrodes) is to increase the performance characteristics of fuel cells at high current densities using innovative membrane electrode assemblies (MEAs). One way of approaching this is to minimise the mass transport losses in the catalyst layer at high current densities, a process which is influenced to a significant extent by the interaction of electrode microstructure and oxygen electrode supply. The optimisation process is conditional upon improving the structuring and utilisation of the precious metal catalysts.

The scientists are therefore studying the composition of the inks used to manufacture the electrodes and catalyst layers. Such catalyst inks are made by spraying the electrolyte membrane with an ink made from catalyst particles and an ionomer dispersion. The composition of the dispersing agent has a key influence on the size distribution of the ionomers in the catalyst ink. It was possible to control the mass transport properties of the electrodes through the ionomer agglomerate size distribution by varying the composition of the dispersing agent, which consists of water and various alcohols. The percentage of ionomer agglomerates in the 200–500 nm range has proven to be particularly significant when it comes to minimising the mass transport losses.

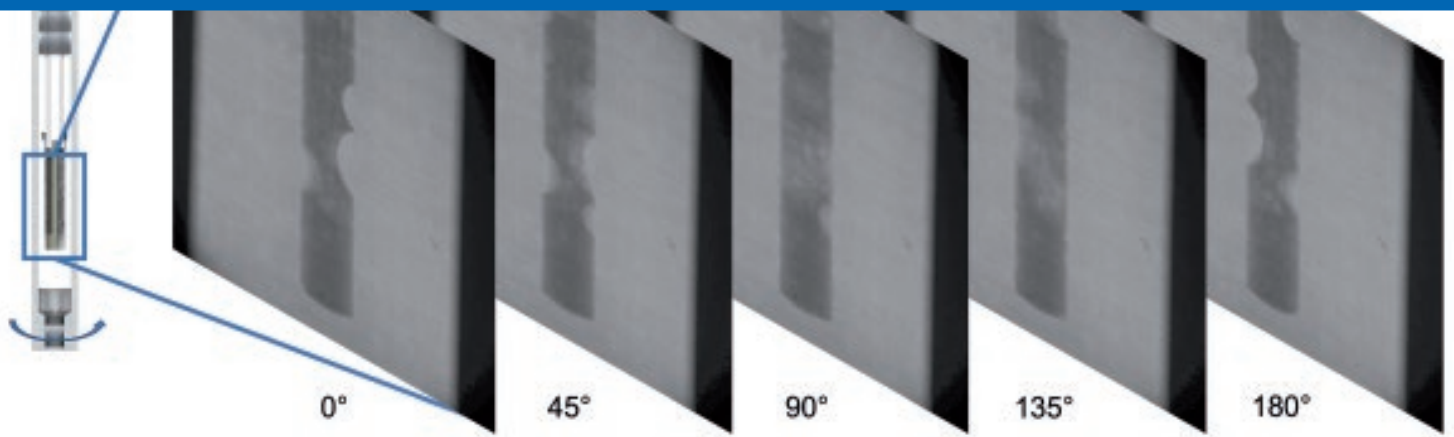


// Abhängigkeit des Stofftransportwiderstands von Menge an Ionomeragglomeraten im Größenbereich von 200–500 nm.
 // Mass transport resistance plotted against the quantity of ionomer agglomerates in the 200–500 nm range.

// Sylvain Brimaud

E-mail: sylvain.brimaud@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-615

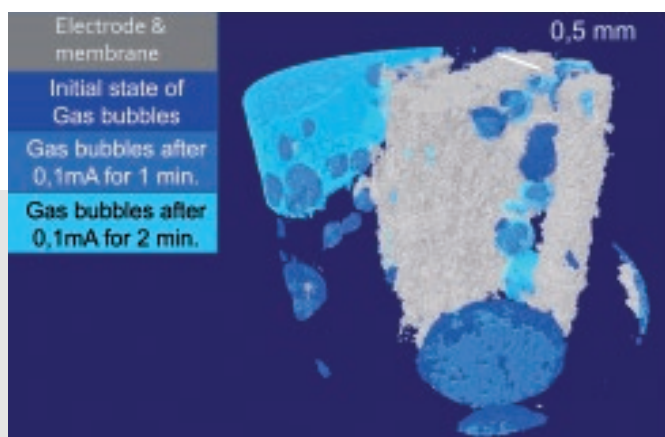


// Poröse 3D-Elektrodenmaterialien zur alkalischen Wasserelektrolyse

Der Wirkungsgrad der elektrolytischen Wasserspaltung im wässrigalkalischen Elektrolyten ist stark vom Abtransport der entstehenden Gasblasen von der Elektrode abhängig. Bildet sich ein Gasblasenvorhang zwischen den Elektroden, so steigt der Innenwiderstand der Elektrolysezelle. Durch die spezifische Gestaltung der Zellgeometrie und der Elektrodenoberfläche kann der Gasblasentransport beeinflusst werden.

Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekts „Neuartige poröse 3D-Elektrodenmaterialien zur effizienteren alkalischen Wasserelektrolyse (AEL_{3D})“ wurde eine Elektrolysezelle entwickelt, mit der die Entstehung und der Transport von Gasblasen in der Zelle mittels kalter Neutronenstrahlung am NeXT-Grenoble-Experiment des Institut Laue-Langevin (ILL) während des Elektrolysebetriebs in einer zylindrischen Mikrozele abgebildet werden können. Bildgebende Verfahren mit Neutronenstrahlung eignen sich ausgezeichnet dafür, da sie einen hohen Kontrast zwischen Gas und Elektrolytphase bieten, während gleichzeitig die Schwächung durch die Metallelektroden gering ist (Abbildung unten).

Im Verlauf der Untersuchungen wurden zudem Radiografien mit einer zeitlichen Auflösung von 0,1 s aufgezeichnet, um die Dynamik der Zweiphasenströmung näher zu untersuchen. Durch den Einsatz eines verbesserten Detektors konnte die Auflösung auf 3,5 µm reduziert werden. Für zukünftige Untersuchungen in Kooperation mit dem ILL ist die Anwendung der entwickelten Messmethoden auf neuartige Elektrodenstrukturen sowie eine Kombination aus Operando-Untersuchung und Tomografie geplant.



// Porous 3D electrode materials for alkaline water electrolysis

The efficiency of the electrolytic water splitting process in the aqueous alkaline electrolyte is heavily dependent on the removal of the gas pockets from the electrode. If gas bubbles form a curtain between the electrodes, the internal resistance of the electrolytic cell will increase. The gas bubble transportation can be influenced by the specific design of the cell geometry and the electrode surface.

The Federal Ministry of Education and Research funded the project "Novel porous 3D electrode materials for efficient alkaline water electrolysis" ("Neuartige poröse 3D-Elektrodenmaterialien zur effizienteren alkalischen Wasserelektrolyse" - AEL_{3D}) which saw the development of an electrolysis cell which could map the formation and transport of gas bubbles in the cell by means of cold neutron radiation in a cylindrical microcell during electrolysis operation at the NeXT-Grenoble experimental station at the Institut Laue-Langevin (ILL). Imaging methods with neutron radiation are excellent for this as they provide a high degree of contrast between gas and electrolyte phase, accompanied at the same time by a low level of attenuation through the metal electrodes (see diagram below).

Radiography was also used in the course of the project to take images with a time resolution of 0.1 s in order to examine the dynamics of the two-phase flow more closely. It was possible to reduce the resolution to 3.5 µm by using an improved detector. Plans for future research studies in cooperation with the ILL include the application of the measurement methods to new electrode structures and a combination of in-operando testing and tomography.

// 3D-Rendering der Gasblasenentwicklung an einer Modellelektrode im alkalischen Elektrolyten.

// 3D rendering of the development of gas bubbles in a model electrode in the alkaline electrolyte.

// Michael Liebert

E-mail: Michael.liebert@zsw-bw.de

Phone: +49 731 9530-216

// Brennstoffzellen Stacks (ECB)

Fuel Cell Stacks (ECB)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECB ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymer-elektrolytmembran-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.

Wir optimieren Brennstoffzellen auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Außerdem entwickelt ECB manuelle und automatisierte Herstellertechniken für PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks einschließlich automobiltauglicher Brennstoffzellen.

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 mittels modernster Simulationsverfahren ein. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen mittels einer μ -CT-Anlage untersucht und validiert. Mit der μ -CT-Anlage können Strukturen von Gasdiffusionslagen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden. Ergänzend stehen am ZSW vorhandene Analysetechniken (z. B. FIB-SEM) sowie mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiografie und -tomografie zur Verfügung, deren zeitliche und räumliche Auflösungen zu den weltweit besten gehören.

// Our core areas of expertise

The ECB research department specialises in the development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC). 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.

We optimise the output, service life, efficiency and compactness of fuel cells. This involves various processes like investigating and forecasting ageing processes and analysing faults. ECB also develops manual and automated manufacturing technologies for PEMFC components, cells and stacks, including automotive-grade fuel cells.

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 using advanced simulation software. The simulation results are verified using robust hardware and conducting experiments under realistic conditions. For example, the water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using a μ -CT system. It is also possible to investigate gas diffusion layers structures under compression, including their water content, with the μ -CT system. 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 ihren Komponenten in Bezug auf Design, Fertigung, Leistung und Lebensdauer.“

“Our work focusses on optimising fuel cells with all their components in terms of design, manufacturing, performance and service life.”

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



Beschleunigte Alterungstests für Brennstoffzellen in Fahrzeugen

Das ZSW war Teil des Europäischen Kooperationsprojekts ID-FAST (2018–2021), in dem beschleunigte Alterungstests (Accelerated Stress Test, AST) für automobilen Anwendungen entwickelt wurden. Mit Ende des Jahres 2021 wurde das Projekt erfolgreich abgeschlossen. Beim öffentlichen Abschlussworkshop konnte mit über 100 Teilnehmern aus mehr als 50 Firmen und Instituten eine sehr gute Resonanz erzielt werden.

Viele der bekannten ASTs verwenden zum Erzielen einer beschleunigten Alterung Betriebszustände der Brennstoffzelle, die während des automobilen Betriebs nicht auftreten. Dies ermöglicht zwar z. B. den Vergleich verschiedener Materialien, macht es aber praktisch unmöglich, den Alterungszustand nach dem AST einer Betriebsdauer im Realbetrieb zuzuordnen. Hier verfolgte das ID-FAST-Projekt einen anderen Ansatz.

Aufbauend auf einem neuen, realistischen Testprogramm für Labor-Dauertests von Brennstoffzellenstapeln erfolgte eine durch spezielle Analysetechniken und Simulationen unterstützte Übertragung der realen Verhältnisse auf kleinere Einzelzellen. Die dadurch ermöglichte Analyse der relevanten Stressoren während des realistischen Dauerbetriebs diente als Basis zur Entwicklung beschleunigter Alterungstests, die deutliche zeitliche Beschleunigungsfaktoren erzielen, während die Vergleichbarkeit der Alterungsmechanismen erhalten bleibt. Diese wurden in einem letzten Schritt wieder auf anwendungsnahe Stapeldesigns übertragen. Die im Projekt entwickelten Prozeduren werden publiziert und in laufende Standardisierungsprozesse eingebracht, sodass sie der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.*

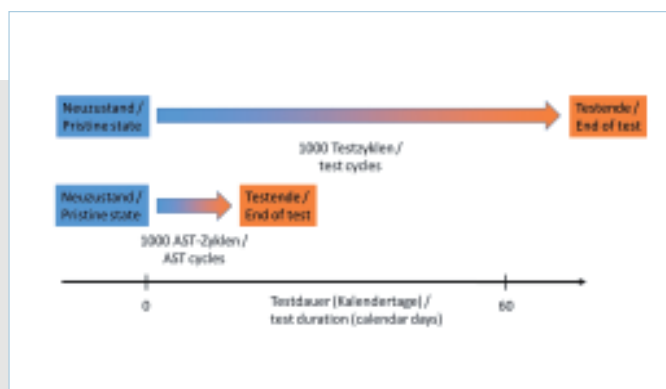
// Accelerated aging tests for fuel cells in vehicles

The ZSW collaborated in the European ID-FAST project (2018–2021) which involved the development of Accelerated Stress Tests (AST) for automotive applications. The project was successfully completed at the end of 2021. There was a great response at the closing event, with over 100 people from more than 50 companies and institutes attending the final public workshop.

Many of the known ASTs use fuel cell operating states which do not occur during automotive operation in order to achieve accelerated ageing conditions. This does allow a comparison of different materials, for example, but it also makes it practically impossible to attribute the state of ageing after the AST to operating time in real-life conditions. The ID-FAST project took a different approach to this process.

Based on a new realistic program for laboratory fatigue tests on fuel cell stacks, the real conditions were transferred to smaller individual cells in a process aided by special analysis techniques and simulations. This enabled an analysis of the relevant stress factors during realistic continuous operation and this served as the basis for the development of Accelerated Stress Tests which achieve significant acceleration factors over time while maintaining the comparability of the ageing mechanisms. The final step was to transfer these back to application-oriented stack designs. The procedures developed in the project will be published and incorporated into ongoing standardisation processes, making them available to the general public.*

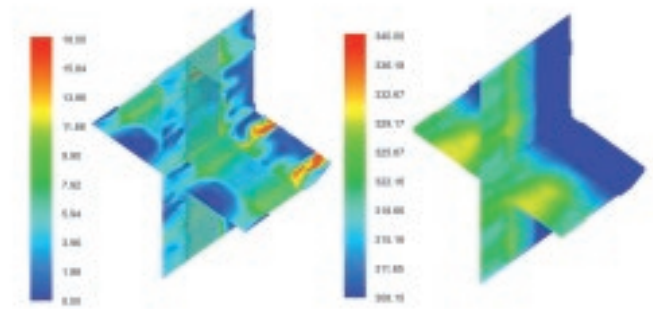
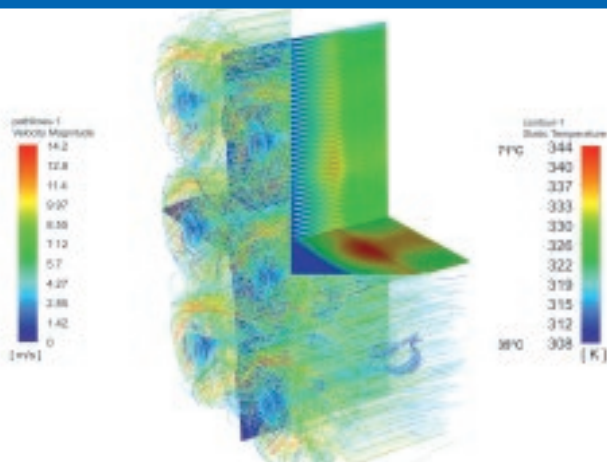
* This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking under grant agreement No (779565) (project ID-FAST). This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe research.



// Prinzipdarstellung: Realistischer Dauertest (oben) und beschleunigter Alterungstest (AST, unten) mit vergleichbarem Zustand der Zelle nach Testende.

// Diagram illustrating a realistic fatigue test (top) and Accelerated Stress Test (AST) (bottom) allowing a comparison of the condition of the cell at the end of the test.

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



// H₂ Fuel Cell Tube: Kompaktes, leichtes Hochleistungs-Brennstoffzellenmodul

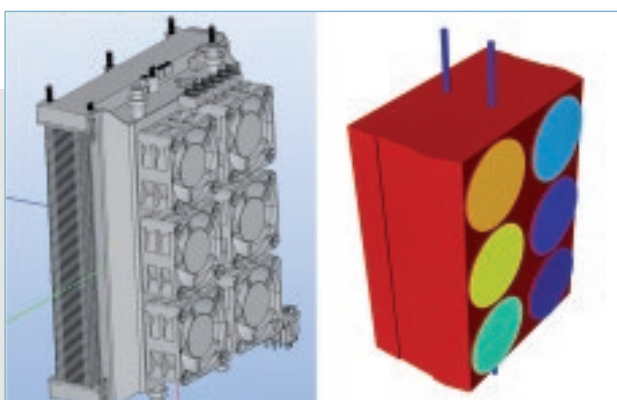
Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung eines kostengünstigen und serienreifen Brennstoffzellensystems, das die beim Industriepartner vorhandenen Batteriespeicher (Energy Tube) um die Vorteile der Brennstoffzelle (z. B. schnelles Tanken) ergänzen und die Effizienz steigern soll. Das als H₂ Fuel Cell Tube bezeichnete System besteht aus einem 0,5-kW-Brennstoffzellenstack und einem Wasserstoffspeicher. Der Einsatz ist für stationäre (z. B. Notstromversorgung), mobile (z. B. Lastenfahrzeug) und portable (z. B. elektrische Werkzeuge und Geräte) Anwendungen vorgesehen. Die Stack-Kathode besitzt offene Kathodenkanäle, die durch Axiallüfter kontinuierlich mit Reaktions- und Kühlluft versorgt werden. Im Basisdesign ist eine reine Luftkühlung vorgesehen, weshalb die Lüfterströmung vor allem zum Kühlen benötigt wird. Die Anodenseite wird im Dead-End Mode betrieben.

Das ZSW bearbeitet das Teilprojekt „Auslegung der Versorgungsstrukturen für den Brennstoffzellenstapel“. In diesem Teilprojekt werden die Kathoden- und die Anodenseite unter Berücksichtigung des Reaktanden- und Wärmetransportes mittels CFD (computational fluid dynamics) simuliert und von einem ursprünglichen Design ausgehend Weiterentwicklungen untersucht (s. Abb. unten). Zu diesem Zweck wurden Halbzellrechnungen des gesamten Stacks auf der Kathodenseite unter Einsatz sehr hochaufgelöster Rechengitter mit bis zu 190 Mio. Zellen, einer Anoden-Halbzelle sowie Vollzellrechnungen einer Einzelzelle durchgeführt (s. Abb. oben). Die Ergebnisse der Berechnungen haben wesentliche Beiträge zur konstruktiven Verbesserung der Luftzuführung, zur Auswahl der Lüfter und zur Wahl der Betriebsbedingungen geliefert. Experimentelle Ergebnisse konnten validiert und die Machbarkeit der Projektziele gezeigt werden. Das Projekt wird durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) finanziell gefördert.

// H₂ fuel cell tube: compact, lightweight, high-performance fuel cell module

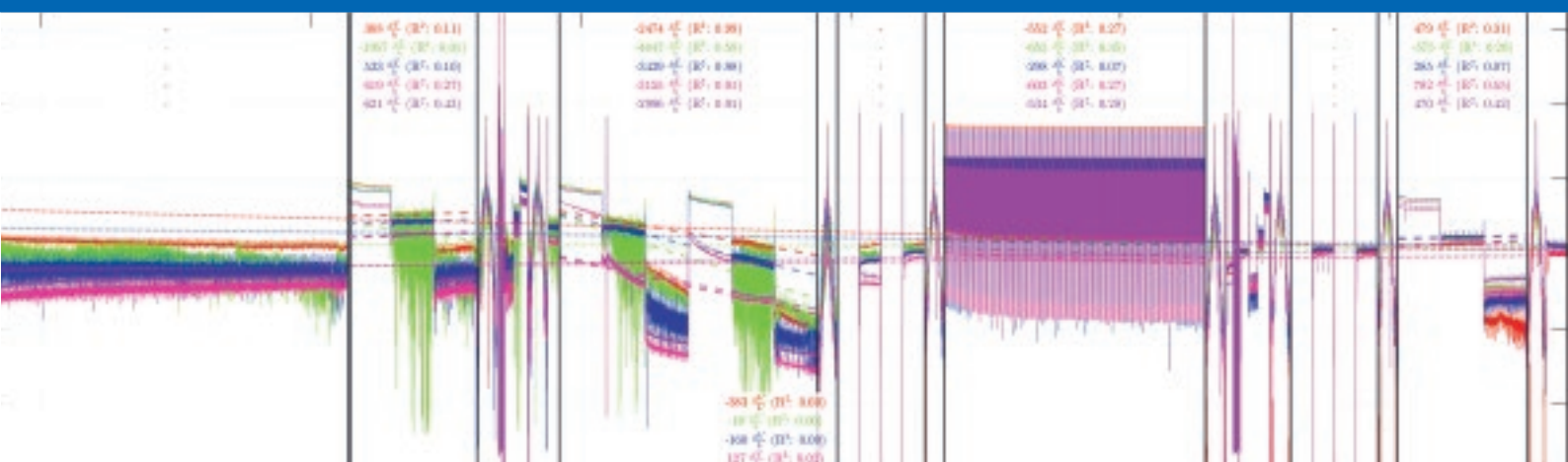
The aim of the joint project is to develop a cost-effective fuel cell system which is ready for serial production with a view to enhancing the battery storage facility (energy tube) currently operated by the industry partner with the added advantages of the fuel cell (e.g. fast refuelling) and in a bid to increase efficiency. The system is called the H₂ fuel cell tube and consists of a 0.5 kW fuel cell stack and a hydrogen storage device. It is envisaged for use in stationary (e.g. emergency power supply), mobile (e.g. cargo bike) and portable (e.g. electrical tools and equipment) applications. The stack cathode has open cathode channels which receive a continuous supply of reactive and cooling air from axial fans. The original design features a basic air cooling system, which is why the fan is mainly required for cooling. The anode side is operated in dead-end mode.

The ZSW is working on the design of the supply structures for the fuel cell stack ("Auslegung der Versorgungsstrukturen für den Brennstoffzellenstapel"). This part of the project involves the simulation of the cathode side and anode side by means of CFD (computational fluid dynamics), taking into account the reactant and heat transport, and the investigation of further developments based on an original design (see fig. below). The approach adopted to this end was to conduct half-cell calculations of the entire stack on the cathode side using very large computational grids with up to 190 million cells and an anode half-cell, and to carry out full-cell calculations on a single cell (see fig. above). The results of the calculations have led to significant changes in terms of improving the design of the air supply system, selecting the fans and choosing the operating conditions. Results of experiments have been validated and the feasibility of the project aims has been duly demonstrated. The project is funded by the Central Innovation Programme for SMEs (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand - ZIM).



// Brennstoffzellenstack mit angeflanschten Lüftern: links CAD; rechts CFD.
// Fuel cell stack with flange-mounted fans (left: CAD; right: CFD).

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



// Anforderungen an die Kathodenluftqualität für PEM-Brennstoffzellen

Im Rahmen des Projekts wurde der Einfluss von luftgetragenen Kontaminationen auf die Kathode einer automobilnahen Brennstoffzelle untersucht. Um die zulässigen Schadstoffkonzentrationen zu bestimmen, wurden experimentelle und modellierende Aktivitäten durchgeführt (s. Abb. unten). Basierend auf Literaturdaten zur regionalen Verteilung und Schadpotenzial wurden SO₂, NO₂, NH₃ und Toluol als hochrelevant und repräsentativ identifiziert.

Mehrere PEM-Brennstoffzellenstacks wurden über insgesamt mehr als 7.000 Stunden hinsichtlich ihres Verhaltens unter Schadgaskonzentrationen charakterisiert. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten starke Unterschiede in den Spannungsabfällen. Während Toluol in Konzentrationen unter 50 ppb und NO₂ in Konzentrationen unter 300 ppb für normale und 150 ppb für schwach beladene Kathoden nur einen weitgehend reversiblen Einfluss zeigten, zeigt NH₃ in Konzentrationen von 500 ppb oder mehr und SO₂ in Konzentrationen von 30 ppb oder mehr mindestens teilweise irreversible Spannungsabfälle. Diese können durch geeignete Luftfilter weitestgehend vermieden werden.

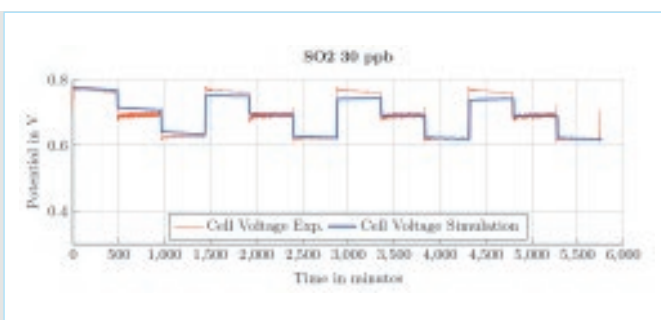
Weiterhin wurden ein Filtermodell sowie ein physikalisches und ortsaufgelöstes Brennstoffzellenmodell für Kathode und Membran erstellt. Es konnte gezeigt werden, dass das entwickelte MATLAB-Modell die resultierenden zeitabhängigen Zellspannungen und damit die resultierende Degradation aus vorgegebenen Schadstoffkonzentrationen, Filtereigenschaften und Brennstoffzellen-Lastzyklen bestimmen kann. Weiterhin kann die Zellspannung als Funktion von Betriebsparametern wie Feuchtegehalt und Stromdichte in Sub-Sekundenzeiten bestimmt werden. Das Modell kann die zeitabhängige Zellspannung bei unterschiedlichen Verschmutzungsgraden und Stromdichten mit hoher Genauigkeit vorhersagen. Das Projekt wurde durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. gefördert.

// Determination of the cathode air quality requirements for PEM fuel cells

The influence of airborne contamination on the cathode of an automotive-style fuel cell (FVV 601295) was investigated in the project. In order to determine the permissible pollutant concentrations, both experimental and modelling activities were carried out (see diagram below). Based on literature data on regional distribution and the harmful potential of pollutants, SO₂, NO₂, NH₃ and toluene were identified as highly relevant and representative.

Several PEM fuel cell stacks were characterised over a total of more than 7,000 hours with regard to their behaviour under pollutant gas concentrations. The investigations showed marked differences in voltage decay. While toluene in concentrations below 50 ppb and NO₂ in concentrations below 300 ppb for normal and 150 ppb for low loaded cathodes only showed a largely reversible influence, NH₃ in concentrations of 500 ppb or more and SO₂ in concentrations of 30 ppb or more shows at least partially irreversible voltage drops. These can be avoided to a great extent by using suitable air filters.

A filter model and a physical and spatially resolved fuel cell model for the cathode and membrane were also constructed. The MATLAB model which was developed could be shown to have the ability to determine the resulting time-dependent cell voltages and therefore the resulting degradation from given pollutant concentrations, filter properties and fuel cell load cycles. Furthermore, the cell voltage can be determined as a function of operating parameters like moisture content and current density in sub-seconds. The model can predict the time-dependent cell voltage with different degrees of pollution and current densities with a high level of accuracy. The project was financed by the Research Association for Combustion Engines (Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V.).



// Experimenteller und modellierter Spannungs-Zeitverlauf einer LT-PEM-Brennstoffzelle unter Exposition mit 30 ppb SO₂.

// Experimental and modeled voltage time curve of an LT-PEM fuel cell exposed to 30 ppb SO₂.

// 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 21 Jahren ein Brennstoffzellen-Testzentrum mit mittlerweile über 35 vollautomatisierten Testständen bis 160 Kilowatt zur professionellen Rund-um-die-Uhr-Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stapeln (engl. Stacks), -Systemen und -Systemkomponenten. Die Schwerpunkte der Tests liegen auf der Beurteilung der Lebensdauer sowie des Gesamtwirkungsgrads und der Robustheit. Ein wichtiges Instrument hierzu sind Dauertests, die mittels umfangreicher Analytik sowie komplexer Methoden zur Fehleranalyse ausgewertet werden. Das Testdatenarchiv umfasst mittlerweile über 440.000 Betriebsstunden (Stand Dezember 2021).

Bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen und Systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen und für Fahrzeuge fließen viele Jahre Forschungsarbeit ein. Das Leistungsspektrum umfasst marktreife Prototypen einschließlich Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Daneben werden Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien und Produktzertifizierungen durchgeführt. Diese erfolgen meist im Auftrag durch die 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. Das Fachgebiet mit seinem tiefen Verständnis der Brennstoffzellentechnik und damit mit 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 (SAE J2601/CEP) 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 Fuel Cell Systems department has been operating a fuel cell test centre for 21 years and it now has over 35 fully automated test rigs of up to 160 kilowatts for professional round-the-clock characterisation of fuel cell stacks, systems and system components. The tests focus on assessing service life, overall efficiency and robustness. Endurance tests are a key instrument in this research and are evaluated using a wide range of tools and complex methods for fault analysis. The test data archive now stands at more than 440,000 operating hours (as at 12/21).

Many years of research work 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. Given its profound understanding of fuel cell technology and the utilisation of hydrogen in this connection, the department 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 (SAE J2601/CEP) 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.“

"In the long run, global climate goals cannot be achieved without hydrogen technology. We must now learn to integrate hydrogen into our everyday lives."

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



// Künstliche Intelligenz (KI) zur Teststandauswertung

Die wesentlichen Herausforderungen für Hochleistungs-Brennstoffzellensysteme, beispielsweise für den Schwerlastverkehr, liegen bei der geforderten Fahrleistung (Lebensdauer) und dem Gesamtwirkungsgrad. Am Brennstoffzellentestzentrum in Ulm können diese beiden kritischen Größen präzise vermessen werden. Im Jahr 2021 wurden im Kundenauftrag über 150.000 Teststunden durchgeführt. Dabei werden bis zu 200 einzelne Messwerte im Sekundentakt aufgezeichnet. Zur zentralisierten und strukturierten Ablage aller Messergebnisse wird am ZSW bereits seit einigen Jahren eine MySQL-Datenbank verwendet. Um die zunehmenden Datenmengen weiterhin analysieren zu können, werden jetzt KI-basierte Werkzeuge zur Echtzeitdatenablage und zur interaktiven Visualisierung eingeführt.

Zur automatisierten Übertragung neuer Messergebnisse von den Testständen in die MySQL-Datenbank setzt ECS auf die Open-Source-Programmiersprache Python, mit deren Hilfe eine Daten-Pipeline aufgebaut wurde. Die Pipeline liest neue Messwerte aus den Logdateien an den Testständen und reicht diese nach einer modernen Internet-der-Dinge-Architektur zunächst an einen zentralen Server weiter, der für die weitere Verarbeitung und Archivierung verantwortlich ist.

Die automatisierte Übertragung der Messdaten in die Datenbank ermöglicht eine einfache und schnelle Bereitstellung der Daten für unsere Kunden, daneben ermöglicht sie eine interaktive Visualisierung der Messergebnisse. Mit Grafana können durch intelligente Mittelwertbildung beliebig große Datensätze effizient visualisiert werden (s. Abb. unten). Gleichzeitig können die Daten interaktiv erkundet und durch den Datensatz zu navigiert werden. Dies dient der internen Datenanalyse und zur Fehlersuche.



// Artificial intelligence (AI) for test rig evaluation

The main challenges facing high-performance fuel cell systems in relevant applications like heavy goods vehicles, for example, are the required mileage (operating life) and the overall efficiency. These two critical parameters can be measured precisely at the fuel cell test centre in Ulm. Over 150,000 hours of testing were carried out on behalf of customers in 2021. Up to 200 individual measurements are recorded every second. A MySQL database has been in use at the ZSW for several years for centralised and structured storage of all test readings. In order to be able to continue to analyse the increasing amounts of data, AI-based tools are now being introduced for real-time data storage and interactive visualisation.

The ECS department relies on the open-source programming language Python for the automated transfer of new measurements from the test rigs to the MySQL database and used the language to set up a data pipeline. The pipeline takes new readings from the log files at the test rigs and, based on a modern Internet-of-Things architecture, initially forwards them to a central server which is responsible for further processing and archiving.

One advantage of the automated transfer of the measurements to the database is that the data can be made available to our customers quickly and easily, and another advantage is that the readings can be processed interactively. With its intelligent calculation of averages, Grafana enables the efficient display of data sets of any size (see diagram below). Interactive exploration of data is also made possible, as is the ability to navigate through the data set. This is used for internal data analysis and troubleshooting.

// Interaktive Visualisierung beliebig großer Datenmengen aus Brennstoffzellentests mit Grafana.

// Interactive visualisation of data sets of any size from fuel cell tests with Grafana.

// Dr. Alexander Kabza

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

Phone: +49 731 9530-832



// Öffentlichkeitsarbeit // Public Relations



// Öffentlichkeitsarbeit

Die Öffentlichkeit erwartet zu den drängenden Themen der Energiewende eine klare und verantwortungsvolle Haltung. Wir bewerten aktuelle Entwicklungen auf Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse, beleuchten Zusammenhänge und benennen mögliche Zielkonflikte. Das Team Presse- und Öffentlichkeitsarbeit bringt den aktuellen Stand der Forschung in wissenschaftlich fundierter und verständlicher Form in die gesellschaftliche Debatte um Nachhaltigkeit und Zukunftssicherung ein.

// NEUSTRUKTURIERUNG DER WEBSITE

Ein Schwerpunkt der Presse- und Öffentlichkeitsarbeit war im Berichtsjahr die Neuaufstellung unserer Forschungsschwerpunkte auf der Website. Das Forschungsfeld am ZSW wird immer breiter, was auch nach außen kommuniziert werden soll. Ein wichtiges Medium hierfür ist der Webauftritt des ZSW. Aus diesem Grund gab es im zweiten Halbjahr 2021 eine Neustrukturierung der Forschungsthemen auf der Website www.zsw-bw.de.

Der Bereich Windenergie erscheint jetzt als eigenständiges Forschungsfeld. Wasserstoff & eFuels wurden zu einem Themenbereich zusammengefasst und Brennstoffzellen zu einem eigenen Themenfeld. Neu ist das Forschungsfeld Circular Economy, bei dem es um die Ressourceneffizienz im Kontext der Energiewende geht. Durch den Einsatz von optimierten Prozessen können Energie, Materialien und Rohstoffe wiedervergestellt, erneuert oder revitalisiert werden. Die Themenbereiche Systemanalyse und Netzintegration wurden unter dem Titel „Energiewende und Systemoptimierung“ zusammengefasst. Mit der Neustrukturierung der Website einher gehen neue Inhalte in Form von Projekten, Anwendungen und Dienstleistungen.

// Public Relations

Members of the public expect a clear and responsible stance on pressing climate issues. We take a view on current developments on the basis of scientific findings, shed light on the wider contexts, point to possible conflicting goals. The press and public relations team translates the latest research findings into understandable language, contributing sound scientific facts to the public debate about future sustainability and security.

// RESTRUCTURING OF THE WEBSITE

One focus of the press and public relations work last year has been the reorganisation of our main research subjects on the website. The range of research at the ZSW is getting broader and broader, with new subjects and fields being added, and there is a duty to communicate this to the outside world. One important channel for this is the ZSW website. This prompted a review in the second half of 2021 of the list of research subjects on the website at www.zsw-bw.de.

The subject of Wind Energy is now listed as a separate field of research. Hydrogen & eFuels were combined to form one subject area and Fuel Cells is now a separate topic. New to the list is the Circular Economy which is about resource efficiency in the context of the energy transition. Energy, resources and raw materials can be restored, renewed or repurposed through the use of optimised processes. The subject of systems analysis and power grid integration has been summarized into “Energy Transition & System Optimisation”. The revision also inspired new website content in the form of projects, applications and services.



// Das ZSW im Porträt.
// Portrait of the ZSW.



// Spatenstich HyFaB v.l.: Frank Bechle, Michael Weber, Christian Mohrdieck, Markus Hölzle, Gunter Czisch, Hans-Georg Ziegler, Ronja Kemmer.
 // Groundbreaking ceremony HyFaB f. l.: Frank Bechle, Michael Weber, Christian Mohrdieck, Markus Hölzle, Gunter Czisch, Hans-Georg Ziegler, Ronja Kemmer.

VERANSTALTUNGEN UND GÄSTE AM ZSW

Aufgrund der Coronapandemie gab es im Jahr 2021 deutlich weniger Präsenztermine mit Medien, Politik und Öffentlichkeit als sonst. Dennoch konnten einige Events durchgeführt und Gäste am ZSW empfangen werden:

SPATENSTICH FÜR HYFAB-FORSCHUNGSFABRIK

Das ZSW in Ulm feierte am 10. Februar mit dem Spatenstich den Beginn der Bauarbeiten für die Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen (HyFaB). HyFaB soll die Serienproduktion von Brennstoffzellen vorantreiben und Unternehmen Orientierung beim Einstieg in die Brennstoffzellentechnologie geben. In einem Neubau des ersten Bauabschnitts mit 3.300 Quadratmetern wird das Brennstoffzellentestzentrum mit aktuell 35 Testständen im Leistungsbereich bis 160 Kilowattstunden bis Sommer 2022 den Betrieb aufnehmen. Bis Jahresende kommen weitere sieben Teststände hinzu. Das Gebäude fördert das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit 10,5 Millionen Euro, weitere 6,5 Millionen Euro sind vom ZSW.

RICHTFEST HYFAB

Nach planmäßiger Bauzeit konnte nach zehn Monaten am 5. Oktober das Richtfest gefeiert werden (siehe Abb. unten). Für die Erforschung der Brennstoffzellenstack-Herstellung wird ein weiteres Gebäude mit 3.000 Quadratmetern errichtet (HyFaB-2). Die Bauarbeiten des zweiten Gebäudeabschnitts starteten im Februar 2022. Der Bau soll bis März 2023 fertiggestellt sein und im Juni 2023 in Betrieb genommen werden. In HyFaB-2 bietet das ZSW Unternehmen eine einzigartige Plattform, die von der Produktion über die Testung bis hin zur Schulung Angebote für gemeinsame Projekte bereitstellt. Das Land Baden-Württemberg fördert diesen Bauabschnitt mit 7,75 Millionen Euro. Der Bund sieht für die nächsten Jahre eine Projektförderung unter Industriebeteiligung von bis zu 30 Millionen Euro vor.

EVENTS

This year there were far fewer face-to-face meetings than usual with the media, politicians and the public due to the coronavirus pandemic. These were some of the major events:

GROUNDBREAKING CEREMONY FOR HYFAB RESEARCH FACTORY

The ZSW in Ulm celebrated the start of construction work for the research factory for hydrogen and fuel cells (HyFaB) in a groundbreaking ceremony on 10 February. HyFaB is intended to expedite the series production of fuel cells and to provide some guidance to companies entering the fuel cell technology market. Boasting a floor area of 3,300 square metres, the new building will house the fuel cell test centre where 35 test rigs outputting up to 160 kilowatt hours will be put into operation by the summer of 2022. Seven more test rigs will be added by the end of the year. The building has been allocated 10.5 million euro in funds by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, with a further 6.5 million euro coming from the ZSW.

HYFAB TOPPING-OUT CEREMONY

The topping-out ceremony was held on schedule on 5 October after a construction time of 10 months (see photographs below). Another building with a floor area of 3,000 square metres will be constructed for research into fuel cell stack production (HyFaB-2). Construction work on the second section of the building started in February 2022. The building is scheduled to be completed by March 2023 and should be operational in June 2023. Once HyFaB-2 is up and running, the ZSW will be in a position to offer companies a unique platform for potential for joint projects covering production and testing all the way through to training. The state of Baden-Württemberg is funding this construction phase to the tune of 7.75 million euro. The federal government has earmarked up to 30 million euro in project funding over the next few years with industry set to share in the investment.





// ZSW-Vorstand Markus Hölzle bei „AKKU ALLE?!“, der ersten gemeinsamen Ausstellung der Ulmer Batterieforschung.
// Markus Hölzle at the first "AKKU ALLE?!" battery exhibition organised by the Ulm battery research cluster.

// BATTERIEAUSSTELLUNG „AKKU ALLE?!“ IN ULM

Der Markt für Batterien boomt und sie müssen auch das halten, was sie versprechen: eine klimafreundliche Energieversorgung und Elektromobilität für uns alle. Dazu bedarf es nachhaltiger Batterien, die (teilweise) erst noch erfunden werden müssen. Mit der „AKKU ALLE?!“ richtete die Ulmer Batterieforschung (Helmholtz-Institut Ulm, Exzellenzcluster POLiS, Forschungsplattform CELEST, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Universität Ulm, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg und Karlsruher Institut für Technologie) gemeinsam eine Ausstellung rund um nachhaltige Energiespeicher und Elektromobilität aus. Begleitet wurde das Event von öffentlichen Vorträgen auf dem Hans-und-Sophie-Scholl-Platz in Ulm.

// HANNOVER MESSE – DIGITAL

Die Hannover Messe als weltweit wichtigste Industrieschau wurde Corona-bedingt digital abgehalten. Das Ulmer ZSW beteiligte sich bei diesem Experiment wie in den Vorjahren im Baden-Württemberg-Pavillon. Dieses für alle neue Format bedeutete Vorträge ohne Publikum, dafür vor großem Technikaufgebot und mit Warten am PC auf Anfragen aus dem Live-Chat statt Messerundgang und Standbesucher. Im Fachprogramm zum Thema „New Mobility Made in Baden-Württemberg“ war das ZSW mit einer Keynote von Professor Markus Hölzle vertreten. Die e-mobil BW strahlte das Programm live und dauerhaft als Video-Aufzeichnung auf YouTube aus. In Summe freuen wir uns über die virtuelle Erfahrung und auf die Rückkehr zu Präsenzevents – Messen müssen real und nicht digital sein.

//“AKKU ALLE?!“ BATTERY EXHIBITION IN ULM

The battery market is booming. At the same time, batteries have to keep their promise of providing an eco-friendly energy supply and electric mobility for all of us. This will require long-lasting batteries, (some of) which are yet to be invented. The exhibition "Akku Alle?!" was a joint event on sustainable energy storage and electromobility at m25 (Münsterplatz 25). It was held from 4 June to 3 August 2021 and it was the first event of its kind to be organised by the Ulm battery research cluster (Helmholtz Institute Ulm, POLiS Cluster of Excellence, CELEST research platform, German Aerospace Center, Ulm University, Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg and Karlsruhe Institute of Technology). The event was accompanied by public lectures in the main square in Ulm called Hans-und-Sophie-Scholl-Platz.

// HANNOVER MESSE DIGITAL EDITION

The Hannover Messe, the world's leading trade fair for industrial technology, was a digital event due to the coronavirus pandemic. The Ulm ZSW took part in this experiment as in previous years in the Baden-Württemberg Pavilion, organised by e-mobil BW. This format was new for everyone and meant talking not to a live audience but to a huge array of screens and waiting at the PC for inquiries on the live chat instead of greeting people visiting the booth on their way around the trade fair. The ZSW was represented by Professor Markus Hölzle who gave a keynote speech on the subject of "New Mobility Made in Baden-Württemberg". e-mobil BW broadcast the programme live and put a video recording of the event on YouTube as a permanent reference. All in all, we are happy about the virtual experience but we are looking forward to returning to face-to-face events – trade fairs need to be physical and not digital.



// Baden-Württemberg-Pavillon digital hinter den Kulissen: Aufzeichnung der Keynote von ZSW-Vorstand Hölzle.

// Behind the scenes at the Baden-Württemberg Pavilion digital event: recording the keynote speech by ZSW Board Member Markus Hölzle.



// Die 17. UECT im Congress Centrum Ulm und zum ersten Mal auch digital.
 // The 17th UECT at the Congress Centrum Ulm and for the first time also as digital.

// 17. ULM ELECTROCHEMICAL TALKS (UECT)

Bereits zum 17. Mal veranstaltete das ZSW die Ulm ElektroChemical Talks (UECT), die internationale Konferenz für Industrie, Wissenschaft und Politik. Zwei Tage lang wurden zahlreiche Themen diskutiert. Es wurde deutlich, dass es bei den technischen Entwicklungen zu Batterien und Brennstoffzellen große Fortschritte gibt und dass sich zudem das Bild einer klimaneutralen Energiewirtschaft, basierend auf grünem Strom und Wasserstoff, wie ein Puzzle langsam zusammenbaut. Leider konnte auch die UECT Corona-bedingt nur in einem kleineren Rahmen stattfinden. Umso erfreulicher war es, dass der direkte Austausch vor Ort doch möglich war. Alternativ gab es auch einen Online-Zugang zu den Vortragsessions. In einer begleitenden Posterausstellung stellten Nachwuchswissenschaftler und -wissenschaftlerinnen ihre Ergebnisse vor. Die besten wurden mit den UECT Awards prämiert. Die 18. UECT werden am 14./15. Juni 2023 wieder im Maritim in Ulm stattfinden.

FVEE-JAHRESTAGUNG IM BERLINER UMWELTFORUM

ZSW-Geschäftsführer Professor Frithjof Staiß leitete gemeinsam mit Dr. Sarina Keller (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) die Jahrestagung des Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE), die unter dem Motto „Mit Wasserstoff zur Klimaneutralität – von der Forschung in die Anwendung“ vom 11. bis 12. November im Berliner Umweltforum als Hybrid-Veranstaltung stattfand. Die FVEE-Tagung präsentierte sich als Schaufenster der aktuellen Wasserstoff-Forschung. Die Vorträge stellten die große Bandbreite von Technologien zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff vor und zeigten die vielfältigen Chancen, die Wasserstoff dem künftigen Energiesystem bietet. Maïke Schmidt (ZSW) stellte die politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen für eine neue Wasserstoff-Ära vor. Das ZSW war außerdem mit einem Messestand im Umweltforum vertreten.

17TH ULM ELECTROCHEMICAL TALKS (UECT)

It was the 17th time that the ZSW ran the Ulm ElectroChemical Talks (UECT), international conference for industry, science and politics. Various subjects were discussed on 22/23 November. A clear picture emerged of great progress in technical developments in batteries and fuel cells while the pieces of the puzzle showing a climate-neutral energy sector based on green electricity and hydrogen are slowly being put into place. Unfortunately the UECT was also affected by the coronavirus pandemic in that it was reduced in scale. The opportunity to attend the event and talk in person was all the more welcome in the circumstances. There was also the alternative option of online access to the talks and lectures. Young scientists presented their results in an accompanying poster exhibition. The best were singled out for UECT Awards. The 18th UECT will be held at the Maritim Hotel in Ulm again on 14/15 June 2023.

FVEE ANNUAL CONGRESS IN THE BERLIN ENVIRONMENTAL FORUM

ZSW CEO Professor Dr. Frithjof Staiß led the annual FVEE (Renewable Energy Research Association) congress this year with Dr. Sarina Keller (German Aerospace Center) at the Berlin Environmental Forum (Umweltforum) from 11 to 12 November. It was a hybrid event looking at the journey from research to application for hydrogen on the way to climate neutrality. Hydrogen can make a key contribution to the urgently needed climate neutrality of the energy system. The conference of the FVEE is a showcase event for the latest hydrogen research. The lectures covered the wide range of technologies for the production, storage and use of renewable hydrogen and highlighted the many opportunities which hydrogen has to offer for the future energy system. Maïke Schmidt (ZSW) presented the general political and economic framework for a new hydrogen era. The ZSW also had a booth at the Environmental Forum



// Vorstand Frithjof Staiß bei der Eröffnung der FVEE-Jahrestagung in Berlin.
 // ZSW CEO Professor Dr. Frithjof Staiß at the opening of the annual FVEE congress in Berlin.



// Zurück zu den Anfängen: Die ehemalige ZSW-Mitarbeiterin Ursula Eicker kam als Referentin. Im Bild mit Anton Kaifel.

// Back to the roots: former ZSW employee Ursula Eicker attended as a speaker. Seen here with Anton Kaifel.

// VON MONTREAL NACH STUTTGART

Von der Concordia University Kanada kam Professorin Ursula Eicker zu einem Vortrag an das ZSW. Ursula Eicker begann ihre berufliche Laufbahn als wissenschaftliche Mitarbeiterin am ZSW in Stuttgart. Im Alter von 29 Jahren wurde sie zur Professorin für Bauphysik an die Hochschule für Technik in Stuttgart berufen. Sie war dort zugleich Dekanin für den Master-Studiengang „Sustainable Energy Competence“ und Leiterin des Instituts für angewandte Forschung. An der Concordia University in Montreal arbeitet sie unter anderem an Simulationen, Technologien und Strategien für kohlendioxidfreie und nachhaltige Städte. In ihrem Vortrag, der von ZSW-Mitarbeiter Anton Kaifel organisiert wurde, zeigte sie auf, wie man innovative Technologien, natürliche Ressourcen und künstlerische Gestaltung miteinander kombinieren kann, um die Städte der Zukunft zu bauen.

// BESUCHE VON POLITIK UND PARTEIEN

Das Interesse an den Forschungsarbeiten des ZSW ist groß. Mitglieder aller Parteien kommen regelmäßig zu Informationsbesuchen nach Stuttgart und Ulm. Aufgrund der Coronapandemie waren es 2021 etwas weniger Besuche als sonst. Im Februar war der SPD-Landtagskandidat Carsten Singer am ZSW in Stuttgart. Dr. Stefan Kaufmann besuchte das ZSW im Rahmen des Wasserstofftags Stuttgart im März. Im Herbst folgte ein Besuch der Grünen-Landtagsabgeordneten Svantje Sperling mit einer Delegation ihrer Landtagsfraktion zum Thema „Forschung und Trends in der Photovoltaik“ und im November informierte sich die ÖDP/CDU-Fraktion über die Arbeit am ZSW-Stuttgart.

// FROM MONTREAL TO STUTTGART

Professor Ursula Eicker came all the way from Concordia University Canada to the ZSW to give a lecture. Ursula Eicker started her scientific career as a research assistant at the ZSW in Stuttgart. At the age of 29 she was appointed Professor of Building Physics at the Stuttgart University of Applied Sciences where she was also in charge of the master's course in "Sustainable Energy Competence" and headed up the "Institute for Applied Research". Part of her role at Concordia University in Montreal is working on simulations, technologies and strategies for sustainable zero-carbon cities. In her lecture, which was organised by ZSW employee Anton Kaifel, she showed how innovative technologies, natural resources and artistic design can all be combined to build the cities of the future.

// VISITS FROM POLITICIANS AND PARTIES

There is great interest in the research work being done at the ZSW. Members of all parties come to Stuttgart and Ulm regularly on fact-finding missions. There were slightly fewer visits than usual in 2021 due to the coronavirus pandemic. Carsten Singer, the SPD candidate for the state parliament, was at the ZSW in Stuttgart in February. Dr. Stefan Kaufmann visited the ZSW in March to mark the Stuttgart hydrogen awareness day (Wasserstofftag Stuttgart). A visit from Svantje Sperling, member of the state parliament for the Greens, followed in autumn, and the ÖDP/CDU parliamentary group came to the Stuttgart ZSW in November to find out about its work.



// Im Expertengespräch: Dr. Marc-Simon Löffler (links) und Dr. Stefan Kaufmann.

// Expert opinions: Dr. Marc-Simon Löffler (left) and Dr. Stefan Kaufmann.



// Besuch von Swantje Sperling (Mitte) am ZSW.

// Swantje Sperling, member of the state parliament (centre), on a visit to the ZSW.

// VIRTUELLE EXKURSION DER UNIVERSITÄT OLDENBURG

Im Rahmen des internationalen Postgraduate Programme Renewable Energy der Universität Oldenburg besuchten über 40 Teilnehmende aus zwei Jahrgängen des Programms das ZSW Stuttgart in einer virtuellen Exkursion. Sie bekamen einen Überblick über die Forschungsthemen des ZSW und einen Einblick in den Markthochlauf der Wasserstoff-Technologie am Beispiel der Power-to-Gas-Anlage in Wyhlen, die als Reallabor der Energiewende gefördert wird. Abgerundet wurde der virtuelle Besuch mit dem Erfahrungsbericht eines ZSW-Kollegen über die Arbeit eines Wissenschaftlers im Themengebiet Netzintegration am ZSW.

// VIRTUAL EXCURSION TAKEN BY THE UNIVERSITY OF OLDENBURG

Over 40 students in their first year or second year on the international Postgraduate Programmes Renewable Energy run by the University of Oldenburg visited the ZSW Stuttgart on a virtual excursion. They were given a general introduction to the research subjects studied at the ZSW and an insight into the rapid routes to market for hydrogen technology, based on the example of the power-to-gas plant in Wyhlen which is being funded as a real-world laboratory for the energy transition. The virtual visit was rounded off with a progress report by a ZSW colleague on the work of a research scientist in the field of grid integration at the ZSW.

// MEDIENARBEIT 2021:

Medienarbeit ist ein wichtiger Aspekt der Öffentlichkeitsarbeit. Ziel ist es, die Medien über verschiedene Kanäle wie Pressekonferenzen, Pressemitteilungen und Pressegespräche kontinuierlich mit Informationen zu versorgen. Gleichzeitig soll Vertrauen aufgebaut werden. Im vergangenen Jahr wurde insgesamt 3.270 Mal – also im Schnitt neun Mal pro Tag – über das Institut berichtet. Das ZSW war in den wichtigsten überregionalen und regionalen Zeitungen vertreten, wie Handelsblatt, Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Wirtschaftswoche, Tagesspiegel Background Energie, Stuttgarter Zeitung oder Staatsanzeiger. Außerdem berichteten verschiedene Radio- und TV-Sender über das ZSW, beispielsweise die Tagesschau oder SWR aktuell.

// MEDIA RELATIONS 2021:

Media work is an important aspect of public relations. The aim is to provide the media with a constant stream of information through various channels, such as press conferences, press releases and press interviews. Another objective is to build trust. The media reported on the institute a total of 3,270 times last year – nine times a day on average. The ZSW was featured in the major national and regional newspapers, such as the Handelsblatt, Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Wirtschaftswoche, Tagesspiegel Background Energie, Stuttgarter Zeitung and the Staatsanzeiger. Various radio and TV stations also broadcast reports about the ZSW, including the Tagesschau and SWR aktuell news round-ups.

// TERMINE 2022

Intersolar Europe, München Hannover Messe Einweihung BW Elektrolyse PV-Symposium und Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik	11.–13. Mai 30. Mai bis 2. Juni Juni 21.–23. Juni 2022
Die Woche des Wasserstoffs Süd Wissenschaftsfestival Stuttgart Einweihung Windtestfeld 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Milano F-Cell, Stuttgart	23. Juni bis 2. Juli 25. Juni bis 1. Juli Sommer 26.–30. September 4.–5. Oktober

// DIARY DATES 2022

Intersolar Europe, Munich Hanover Fair Inauguration BW Electrolysis PV Symposium and Forum Building integrated photovoltaics	May 11-13 May 30-June 2 June 21-23 June 2022
Hydrogen Week South Science Festival Stuttgart Inauguration Wind Test Field 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Milano F-Cell, Stuttgart	June 23-July 2 June 25-July 1 Summer September 26-30 October 4-5

// Dokumentation

// Documentation





// Finanzbericht

Financial Information

// EINNAHMEN – AUSGABEN

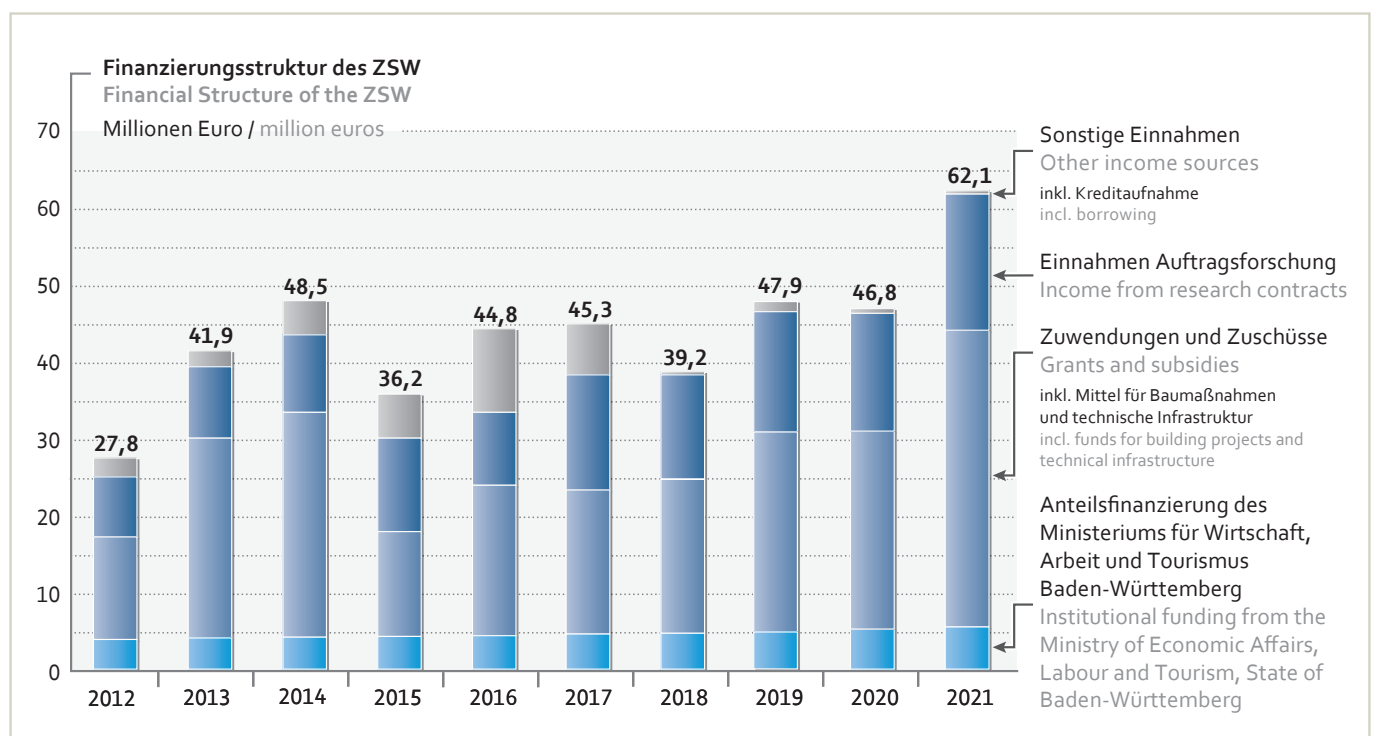
Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 62,1 Mio. Euro und damit über dem Niveau von 2020, weil im Berichtsjahr überdurchschnittlich hohe Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen im Themenfeld Brennstoffzellen zugegangen sind.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2021 um 0,4 Mio. auf 5,5 Mio. Euro.

// REVENUE – EXPENDITURE

The revenue from ordinary business activities in the past year amounted to 62.1 million euro, higher than in 2020 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 0.4 million euro to 5.5 million euro in 2021.





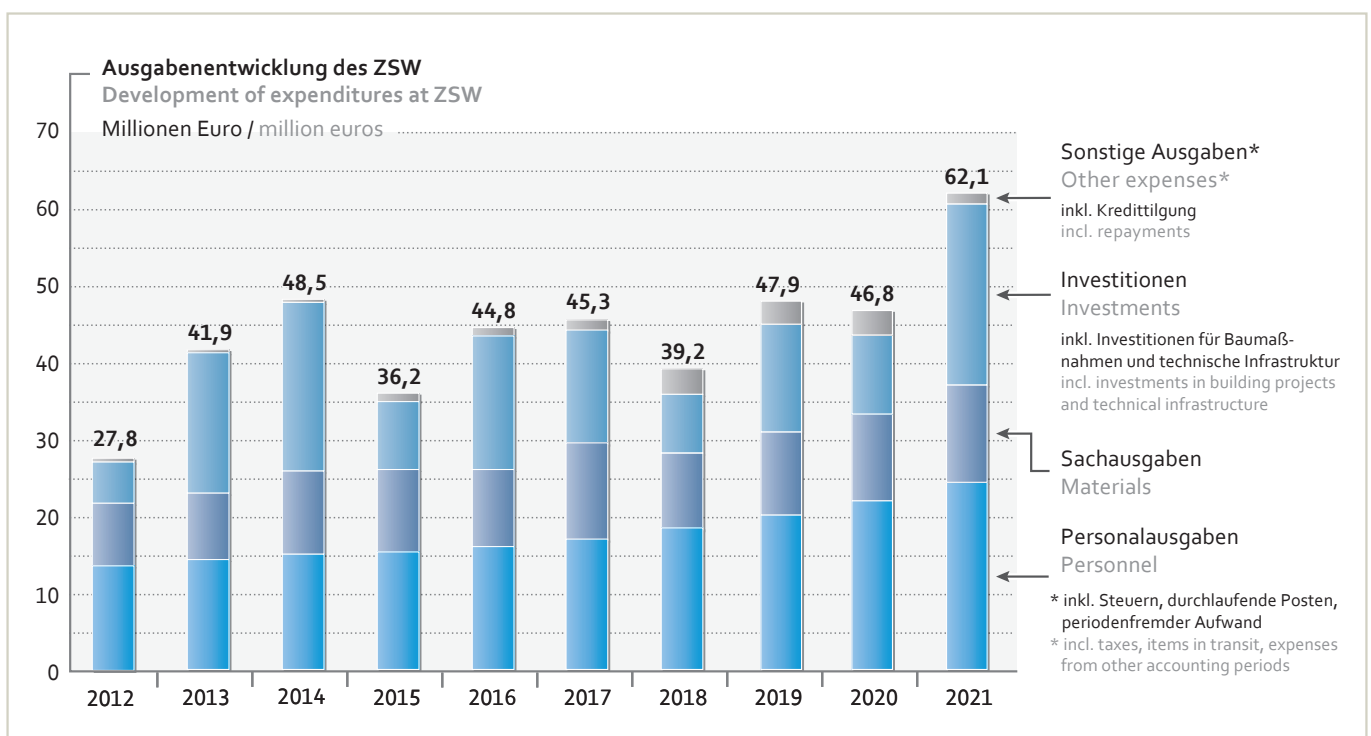
// Foto: Adobe Stock / Murrstock

Das Ausgabevolumen erhöhte sich im Berichtsjahr korrespondierend zu den höheren Investitionen auf 62,1 Mio. Euro.

The expenditure volume increased 62.1 million euro in the reporting year, corresponding to the higher investments.

Die Personalausgaben stiegen aufgrund einer Tarifierhöhung und eines Anstiegs der Personalkapazität auf 24,4 Mio. Euro.

Expenditure on human resources went up to 24.4 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 2021 gegenüber dem Vorjahr von 266 Vollzeitstellen auf 286 erhöht. Das entspricht einer Beschäftigtenzahl von 313. Mit einem Anteil von 85 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau.

Das ZSW ist auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland attraktiv. So haben gut 9 % aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft. Die Kollegen und Kolleginnen kommen aus zehn 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 25 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt rund 110 Beschäftigte teilnahmen. Darüber hinaus standen im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements am ZSW u. a. Angebote zu den Themen Bewegung, Stressprävention und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm, aufgrund der Coronapandemie musste das Angebot allerdings 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 2021, rising to 286 from 266 in the previous year. The number of people employed is 313. With research and scientific staff accounting for 85 % of the total, productivity remains steady and at a high level.

The ZSW also attracts academics from abroad. About 9 % of the employees have foreign citizenship, for example, with colleagues coming from 10 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.

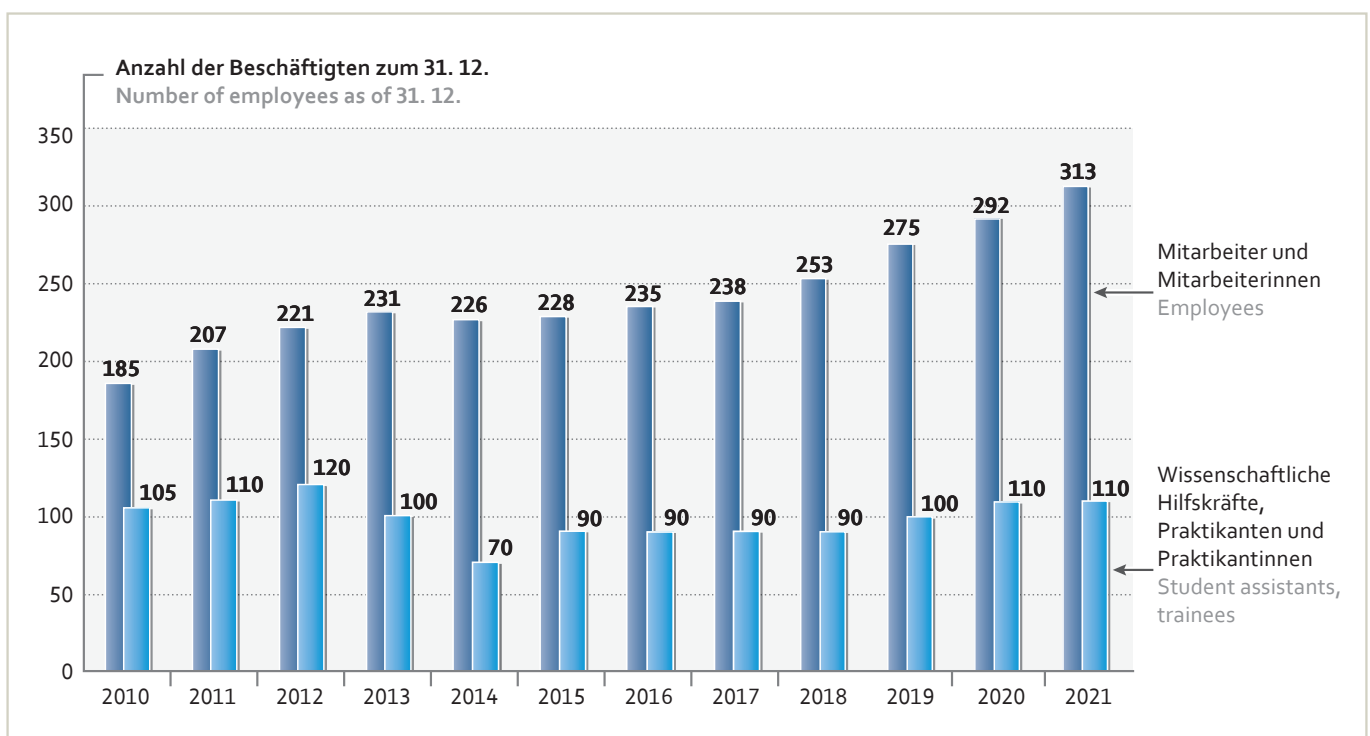
Knowledgeable and dedicated staff are key to our success. The ZSW therefore provides access to a wide range of in-service training courses and professional development opportunities. The contents vary, covering subject knowledge, broader research-related issues, personal development, and training for managers. There is great interest in the courses. There were 25 such events altogether in the year under review, with a total of around 110 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 due to the coronavirus pandemic.



// Foto: Adobe Stock / fizkes

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 2021 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 35 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 2021 in addition to the staff employed under the salary scheme for state employees (Tarifvertrag der Länder - TV-L). In the year under review, 35 postgraduate students completed their doctorates.



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

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

- / Abd-El-Latif A., Sichler P., Kasper M., Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Insights into thermal runaway of Li-ion cells by accelerating rate calorimetry coupled with external sensors and online gas analysis**; Batteries & Supercaps 4 (2021) 1135; <https://doi.org/10.1002/batt.202100023>
- / Buchmann T., Wolf P.; **Analyzing development patterns in research networks and technology**; The Review of Evolutionary Political Economy (2021) 2:55-81; <https://doi.org/10.1007/s43253-021-00035-6>
- / Buchmann T., Wolf P., Fidaschek S.; **Stimulating e-mobility diffusion in Germany (EMOSIM): An agent-based simulation approach**; Energies 2021, 14, 656; <https://doi.org/10.3390/en14030656>
- / Carbonari G., Scurtu R.-G., Waldmann T., Radloff S., Flügel M., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **3D-printed testing plate for the optimization of high C-rates cycling performance of lithium-ion cells**; Journal of the Electrochemical Society 168 (2021) 050508; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abfab9>
- / Cojocar-Mirédin O. (RWTH Aachen Univ.), Raghuvanshi M. (RWTH Aachen), Wuerz R., Sadewasser S. (INL); **Grain boundaries in Cu(In,Ga)Se₂: A review on composition-electronic property relationships by atom probe tomography and correlative microscopy**; Advanced Functional Materials 2021, 2103119; <https://doi.org/10.1002/adfm.202103119>
- / Dongmo S., Maroni F., Gauckler C., Marinaro M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **On the electrochemical insertion of Mg²⁺ in Na₇V₄(P₂O₇)₄(PO₄) and Na₃V₂(PO₄)₃ host materials**; Journal of The Electrochemical Society, 168 (2021) 120541; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac412b>
- / Eslam A., Würz R., Hauschild D. (KIT), Weinhardt L. (KIT), Hempel W., Powalla M., Heske C. (KIT); **Impact of substrate temperature during NaF and KF post-deposition treatments on chemical and optoelectronic properties of alkali-free Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cell absorbers**; Thin Solid Films, Vol. 739, Dec. 2021, 138979; <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.138979>
- / Flügel M., Kasper M., Pfeifer C., Wohlfahrt-Mehrens M., Waldmann T.; **Cu dissolution during over-discharge of Li-ion cells to 0 V - A post-mortem study**; Journal of the Electrochemical Society 168 (2021) 090519; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abdc5f>
- / Guc M. (IREC), Bailo E. (Francisco Alberó S.A.U.), Fonoll-Rubio R. (IREC), Atlan F. (IREC), Placidi M. (IREC), Jackson P., Hariskos D., Alcombe X. (CCITUB), Pistor P. (Univ. Halle-Wittenberg), Becerril-Romero I. (IREC), Perez-Rodriguez A. (IREC), Ramos F. (Francisco Alberó S.A.U.), Izquierdo-Roca V. (IREC); **Evaluation of defect formation in chalcopyrite compounds under Cu-poor conditions by advanced structural and vibrational analyses**; Acta Materialia, Vol. 223, 15 Jan. 2022, 117507; <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117507>
- / Hauschild D. (KIT), Steininger R. (KIT), Hariskos D., Witte W., Tougaard S. (Univ. of Southern Denmark), Heske C. (KIT), Weinhardt L. (KIT); **Using the inelastic background in hard x-ray photoelectron spectroscopy for a depth-resolved analysis of the CdS/Cu(In,Ga)Se₂ interface**; Journal of Vacuum Science and Technology A 39, 063216 (2021); <https://doi.org/10.1116/6.0001336>
- / Keppeler M., Tran H.-Y., Braunwarth W.; **The role of pilot lines in bridging the gap between fundamental research and industrial production for lithium-ion battery cells relevant to sustainable electromobility: A review**; Energy Technology, 2021, Volume 9, Issue 8, 2100132; <https://doi.org/10.1002/ente.202100132>
- / Koprek A. (MPI), Zabierowski P. (WUT), Pawloski M. (WUT), Sharma L. (TU Eindhoven), Freysoldt C. (MPI), Gault B. (MPI), Würz R., Cojocar-Mirédin O. (MPI); **Effect of Cd diffusion on the electrical properties of the Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cell**; Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 224, 1 June 2021, 110989; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.110989>
- / Kudic M. (Univ. Siegen), Müller M. (Univ. Hohenheim), Buchmann T., Pyka A. (Univ. Hohenheim), Günther J. (Univ. Bremen); **Network dynamics, economic transition, and policy design - An introduction**; The Review of Evolutionary Political Economy (2021) 2:1-8; <https://doi.org/10.1007/s43253-021-00038-3>
- / Küffner J., Hanisch J., Wahl T., Zillner J., Ahlswede E., Powalla M.; **One-step blade coating of inverted double-cation perovskite solar cells from a green precursor solvent**; ACS Applied Energy Materials 2021, 4, 10, 11700-11710; <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c02425>
- / Kuntz P. (CEA), Raccurt O. (CEA), Azaïs P. (CEA), Richter K., Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M., Bardet A. (IMP UB RAS), Buzlukov A. (CEA), Genies S. (CEA); **Identification of degradation mechanisms by post-mortem analysis for high power and high energy commercial Li-ion cells after electric vehicle aging**; Batteries 2021, 7(3), 48; <https://doi.org/10.3390/batteries7030048>
- / Maroni F., Dongmo S., Gauckler C., Marinaro M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Through the maze of multivalent-ion batteries: A critical review on the status of the research on cathode materials for Mg²⁺ and Ca²⁺ ions insertion**; Batteries & Supercaps 4 (2021) 1221-1251; <https://doi.org/10.1002/batt.202000330>
- / Matthiss B., Momenifarhani A., Binder J.; **Storage placement and sizing in a distribution grid with high PV generation**; Energies 2021, 14(2), 303; <https://doi.org/10.3390/en14020303>



- / Mohseninia A., Eppler E., Kartouzian D., Markötter H. (HZB), Kardjilov N. (HZB), Wilhelm F., Scholta J., Manke I. (HZB); **PTFE content in catalyst layers and microporous layers: Effect on performance and water distribution in polymer electrolyte membrane fuel cells**; Journal of The Electrochemical Society, 168 (2021) 034509; <https://orcid.org/0000-0002-2418-5148>
- / Radloff S., Kremer L., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Characterization of structured ultra-thick $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ lithium-ion battery electrodes by mercury intrusion porosimetry**; Materials Today Communications 28 (2021) 102549; <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102549>
- / Radloff S., Scurtu R.-G., Hölzle M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Applying established water-based binders to aqueous processing of $\text{LiNi}_{0.83}\text{Co}_{0.12}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$ positive electrodes**; Journal of the Electrochemical Society 168 (2021) 100506; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac2861>
- / Ruggeri I., Martin J., Wohlfahrt-Mehrens M., Mancini M.; **Interfacial kinetics and low-temperature behavior of spheroidized natural graphite particles as anode for Li-ion batteries**; Journal of Solid State Electrochemistry (published online 2021); <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10008-021-04974-2>
- / Schmidt M., Müller-Langer F. (DBFZ), Kretschmar J. (DBFZ), Agert C. (DLR), Bard J. (FhG-IEE), Hebling C. (FhG-ISE), Heinrichs C. (FZJ), Robinus M. (FZJ), Niebelt R. (ISFH), Dittmeyer R. (KIT), Graf F. (KIT); **Grüner Wasserstoff als Schlüsseltechnologie für die europäische Energiewende**; Themen 2020 "Forschen für den Green Deal", Jahrestagung 2020 des FVEE, 2.-4. Nov. 2020, Tagungsband, Juni 2021
- / Waldmann T., Rössler S., Blessing M., Schäfer R., Scurtu R.-G., Braunschwarz W., Wohlfahrt-Mehrens M.; **A direct comparison of pilot-scale Li-ion cells in the formats PHEV1, pouch and 21700**; Journal of the Electrochemical Society, 168 (2021) 090519; <http://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ac208c>
- / Waldmann T., Scurtu R.-G., Brändle T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Increase of cycling stability in pilot-scale 21700 Li-ion cells by foil tab design**; MDPI Processes 2021, 9 (11), 1908; <https://doi.org/10.3390/pr9111908>
- / Walkons C. (Univ. Nevada), Jahandardoost M. (Univ. Nevada), Magorian Friedlmeier T., Hempel W., Paetel S., Nardone M. (BGSU), Ursprung B. (LBNL), Barnard E. (LBNL), Lordi V. (LLNL), Bansal S. (Univ. Nevada); **Behavior of Na and RbF-treated $\text{CdS}/\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells with stress testing under heat light and junction**; Physica Status Solidi (Rapid Research Letters) 2021, 15, 2000530; <https://doi.org/10.1002/pssr.202000530>
- / Weiss M. (Univ. Gießen), Ruess R. (Univ. Gießen), Kasnatscheew J. (HI MS), Levartovsky Y. (Bar-Ilan Univ.), Ronith Levy N. (Technion), Minnmann P. (Univ. Gießen), Stolz L. (HI MS), Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M., Aurbach D. (Bar-Ilan Univ.), Winter M. (HI MS), Ein-Eli Y. (Technion), Janek J. (Univ. Gießen); **Fast charging of lithium-ion batteries: A review of materials aspects**; Advanced Energy Materials 2101126 (2021); <https://dx.doi.org/10.1002/aenm.202101126>
- / Witte W., Hempel W., Paetel S., Menner R., Hariskos D.; **Effects of sputtered In_xS_y buffer on CIGS with RbF post-deposition treatment**; ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2021, 10 (5); <http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/abfc21>
- / Witte W., Paetel S., Menner R., Bauer A., Hariskos D.; **The application of sputtered gallium oxide as buffer for $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells**; Physica Status Solidi (Rapid Research Letters) 2021, 15, 2100180; <https://doi.org/10.1002/pssr.202100180>
- / Wolter M. (Univ. of Luxemb.), Carron R. (Empa), Avancini E. (Empa), Bisig B. (Empa), Weiss T. (Empa), Nishiwaki S. (Empa), Feurer T. (Empa), Buecheler S. (Empa), Jackson P., Witte W., Siebentritt S. (Univ. of Luxemburg); **How band tail recombination influences the open-circuit voltage of solar cells**; Progress in Photovoltaics Res. Appl. 2021, 1-11; <http://dx.doi.org/10.1002/pip.3449>
- / Zhang S. (IPVF), Guc M. (IREC), Salomon O., Würz R., Izquierdo-Roca V. (IREC), Perez-Rodriguez A. (IREC), Kessler F., Hempel W., Hildebrandt T. (IPVF), Schneider N. (IPVF); **Effective module level encapsulation of CIGS solar cells with Al_2O_3 thin film grown by atomic layer deposition**; Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 222, April 2021, 110914; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110914>



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

- / Becher D., Menz F., Böse O., Langenwalder C., Bauer M.; **Novel barriers for preventing thermal propagation - From research to market;** Kraftwerk Batterie, online, 27.-29.4.2021
- / Brega A., Brimaud S.; **Modelling, design and validation of a laminar flow channel electrochemical cell set up for elevated temperature studies of fuel cell electrocatalysts;** 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Brinner A.; **Elektrolytische Wasserstoffherzeugung;** 42. Ulmer Gespräch für "Forum für Oberflächentechnik", Webinarmodul "Neue Antriebe/Energiebereitstellung", 4.5.2021
- / Brinner A., Löffler M.-S.; **Markthochlauf Elektrolyse - Chancen und Herausforderungen für Unternehmen in Baden-Württemberg;** TÜV-SÜD H₂-Forum Baden-Württemberg, Online-Veranstaltung "Wasserstoff im urbanen Raum", 14.10.2021
- / Brinner A., Löffler M.-S., Möllenstedt M.; **Projekt "Elektrolyse - made in Baden-Württemberg", BW-Elektrolyse;** 2021 Storenergy Congress, Online-Veranstaltung, 17.11.2021
- / Essig S., Paetel S., Loy M., Hanisch J., Ahlswede E., Powalla M.; **Perovskite / ACIGS 2-terminal tandem solar cells - Influence of TCO layer thicknesses and an additional ARC layer on solar cell performance;** 1st International tandemPV Workshop 2021, online, 13-16 April 2021
- / Essig S., Paetel S., Magorian-Friedlmeier T., Powalla M.; **Development of (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells by 3-stage co-evaporation;** E-MRS Spring Meeting 2021 Virtual Conference, 31 May - 4 June 2021
- / Essig S., Wahl T., Paetel S., Hariskos D., Friedlmeier T., Loy M., Hanisch J., Ahlswede E., Powalla M.; **Process and layer optimization for the fabrication of highly efficient perovskite / ACIGS thin-film tandem solar cells;** 38th EU PVSEC 2021, online, 6-10 Sept. 2021
- / Geyer D., Huschenhöfer D., Lechner P., Kriening J., Stellbogen D.; **Vorteilhafter Gleichtakt von Erzeugung und Last in Bürogebäuden mit PV-Fassade im Dach;** 36. PV Symposium, online, 18.-26.5.2021
- / Heider E., Nissen J. (cellcentric), Lüdeking I., Jörissen L.; **Implementation of vertical property gradients by direct coating of cathode catalyst layers for PEMFC;** 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Hossain I. (KIT), Gharibzadeh S. (KIT), Fassi P. (KIT), Becker J.-P., Paetel S., Ahlswede E., Paetzold U. (KIT); **Road to 27% perovskite on CI(G)S tandem solar cells;** PVSEC-31, Sydney, 13-15 Dec. 2021
- / Huschenhöfer D., Petzschmann J., Schneider T. (DLR), Sigle S. (DLR); **Balanced priority charging put into practice for an e-mobility fleet of a regional council;** 5th E-Mobility Power System Integration Symposium, Berlin, 27. Sept. 2021
- / Kächele R., Tomschitz C., Rongstock R., Binder J.; **Neue Prosumerlastprofile für Alternative zur Lastgangzählung bei Kleinverbrauchern mit PV-Anlage;** 36. PV Symposium, online, 18.-26. 5. 2021
- / Kartouzian D., Micoud F. (Univ. Grenoble Alpes), Cavoue T. (Univ. Grenoble Alpes), Wilhelm F., Pauchet J. (Univ. Grenoble Alpes), Scholta J.; **Novel approach to gas diffusion layer in PEMFC;** 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Keppeler M., Braunwarth W.; **From fundamentals to pilot-scale for lithium ion battery electrodes containing recycylate;** Querschnittsinitiative Batterielebenszyklus, online, June 2021
- / Klass L., Kabza A., Strecker K., Sehnke F., Hölzle M.; **Machine learning methods for automated fuel cell monitoring;** 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Koprek M., Lüdeking I., Regnet F., Hunger J., Jörissen L.; **Investigation of the impact of PEMFC break-in procedures on long-term durability behaviour;** 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Koprek, M., Schlumberger. R. (Audi), Wachtel Ch. (Audi), Wilhelm F., Messerschmidt M., Scholta J., Hölzle M.; **Local ageing effects of polymer electrolyte fuel cell MEAs exposed to stressful operating conditions;** EFCF 2021: Low-Temp. Fuel Cells, Electrolysers & H₂ Processing, Lucerne, online, 29 June.-2 July 2021
- / Lechner P., Schanz O., Stellbogen D., Mayer J. (Tube Solar), Gallina J. (Tube Solar); **Nutzung von PV-Röhrenmodulen in der Agri-Photovoltaik;** 36. PV Symposium, online, 18.-26. 5. 2021, 1. Preis
- / Lechner P., Wirth H., Kriening J., Weinreich P. (HaWe Engineering), Haas R. (HaWe Engineering); **Rückseitenfolien von PV-Modulen: Status Quo und Erfahrungen aus Feld und Labor;** 36. PV Symposium, online, 18.-26. 5. 2021
- / Lincot D. (CNRS), Ayodhya T. (EMPA), Edoff M. (Uppsala Univ.), Siebentritt S. (Univ. of Luxemb.), Witte W., Sadewasser S. (INL), Bär M. (HZB), Vermang B. (IMEC), Le Gleuher M. (BRGM), Scheer R. (Univ. Halle-Wittenberg), Guillemoles J.-F. (CNRS-IPVF), Fthenakis V. (Columbia Univ.), Powalla M., Weiss T. (Univ. of Luxemb.), Schock H.-W. (ehem. HZB); **Analysis of indium availability not a critical issue for large scale development of CIGS technology;** PVSEC-31, Sydney, 13-15 Dec. 2021
- / Löffler M.-S., Bickel P., Püttner A., Marquard-Möllenstedt T.; **Wasserstoffherzeugung vor dem globalen Markthochlauf - Elektrolysetechnologie aus dem Land für die Welt;** Energiewendekongress Baden-Württemberg, online, 8.7.2021
- / Löffler M.-S., Haugk B., Marquard-Möllenstedt T.; **Elektrolyse made in Baden-Württemberg;** KONGRESS BW, Stuttgart, 14.10.2021
- / Löschel A. (Univ. Münster), Grimm V. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Lenz B. (DLR), Staiß F.; **Die große Klima-Chance;** Frankfurter Allgemeine Zeitung, 16.8.2021

// Ausgewählte Veröffentlichungen

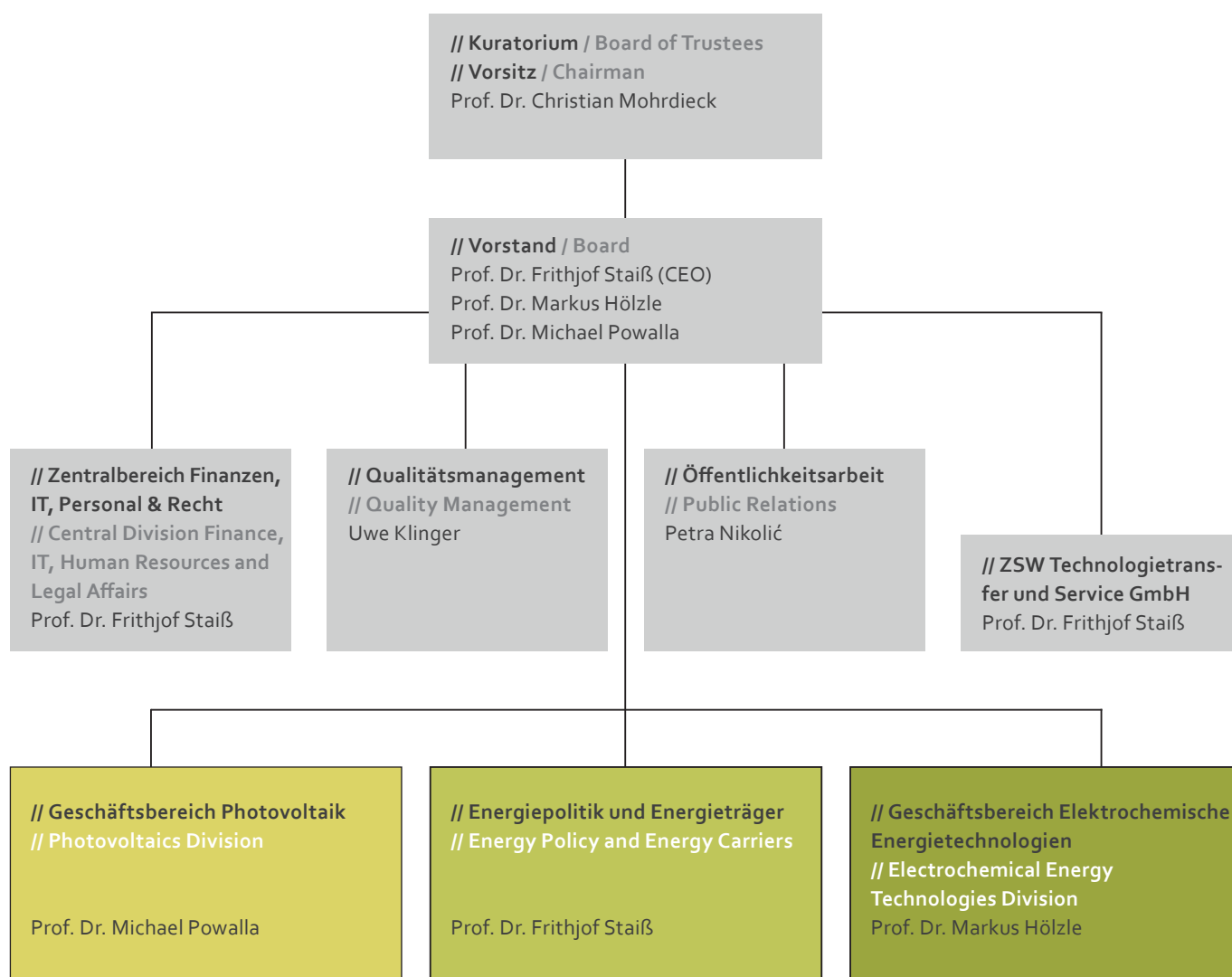
Selected Publications

- / Marini E., Liebert M., Brimaud S., Jörissen L.; **Mapping of the degradation processes at bifunctional CO₂ gas diffusion electrode for aqueous alkaline metal-air batteries**; 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Menz F., Becher D., Baum S., Böse O., Bauer M.; **Measuring vent gas velocity and energy released from ejected and non-ejected contents of large prismatic lithium-ion cells**; Kraftwerk Batterie, online, 27.-29.4.2021
- / Menz F., Becher D., Baum S., Böse O., Bauer M.; **Thermal runaway initialization temperature of fresh and aged prismatic lithium-ion cells**; Kraftwerk Batterie, online, 27.-29.4.2021
- / Rössler S., Blessing M., Tran H.-Y., Braunwarth W.; **Materialabhängige Prozessführung im Befüll- und Formierprozess von PHEV₁-Zellen**; Batterieforum Deutschland, virtuell, 20.1.2021
- / Schmid M., Wagner T., Wiedemann B., Scholta J.; **Effects of impurities in the cathode airflow on PEM fuel cell stacks**; EFCF 2021: Low-Temp. Fuel Cells, Electrolysers & H₂ Processing, Lucerne, online, 29 June.-2 July 2021
- / Schmidt M.; **Green hydrogen - a future global reality?**; 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Schmidt M.; **Impuls: Welche Transportvektoren sind bis zum Jahr 2030 realisierbar?**; Berliner Energietage 2021, Gemeinsame Veranstaltung von ESYS und DECHEMA: Zwischen Wunsch und Wirklichkeit - Wasserstoff aus der Systemperspektive, online, 22.4.2021
- / Schmidt M.; **Green hydrogen for Germany - Where will it come from, how will it be transported?**; f-cell 2021, Stuttgart, 14-15 Sept. 2021
- / Scholta J., Küber P., Knaupp H., Wais A. (m-a-r-s), Kabza A., Jörissen L.; **Online impedance measurements as a testing tool**; 17th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies (MODVAL), Sion, online, 20-22 April 2021
- / Scholta J., Wagner T., Schmid M., Valter V.; **Anforderungen an die Kathodenluftqualität für LT-PEM Brennstoffzellen**; FVV Frühjahrstagung, Frankfurt/M., online, Vortrag und Tagungsbandbericht, Tagungsband R597 (2021), 22.-24.3.2021
- / Sigle S. (DLR), Huschenhöfer D., Schneider T. (DLR); **Projekt eLISA-BW: E-Ladeinfrastruktur intelligent steuern und anbinden in Baden-Württemberg (project eLISA-BW: intelligent control of electric charging infrastructure in Baden-Württemberg)**; VDE ETG Kongress 2021, online, 18.-19.5.2021 (IEEE Xplore, online, 1.7.2021)
- / Staiß F., Löffler M.-S.; **Wasserstoff - von der Vision zum Geschäftsfeld**; Fünftes SmartPro-Partnerschaftstreffen, Hochschule Aalen, 26.7.2021
- / Staiß F., Schmidt M.; **Wasserstoff in der deutschen Energiewende - Ökologische Notwendigkeit und industriepolitische Chance**; Les Entretiens Franco-Allemands de Nancy 2021, Innovation im Dialog, 25.-26.11.2021
- / Tran H.-Y., Scherer K., Römer T., Braunwarth W.; **Impact of Li-ion slurry formulation on cathode defects caused by calendaring process**; Kraftwerk Batterie, online, 27.-29.4.2021
- / Tran H.-Y., Scherer K., Römer T., Braunwarth W., Lindner A. (KIT), Mensklou W. (KIT); **Towards calenderability of high-energy cathode based on NMC622 on roll-to-roll process**; 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Tran H.-Y., Scherer K., Römer T., Diener A., Kwade A., Braunwarth W.; **Einfluss von Rezepturen auf das Verformungsverhalten der Kathode beim Kalendrierprozess**; Batterieforum Deutschland, virtuell, 20.1.2021
- / Wahl T., Essig S., Paetel S., Loy M., Hanisch J., Ahlswede E., Powalla M.; **Perovskite/ACIGS 2-terminal solar cells - influence of TCO layer thicknesses and an additional ARC layer on solar cell performance**; 38th EU PVSEC 2021, online, 6-10 Sept. 2021
- / Waldmann T., Rössler S., Blessing M., Schäfer R., Scurtu R.-G., Braunwarth W., Wohlfahrt-Mehrens M.; **A direct design comparison of Li-ion cells in the formats PHEV₁, pouch, and 21700 built on pilot-scale**; 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Wilhelm F., Hunger J., Jörissen L.; **Lebensdaureffekte auf Stackebene**; VDMA AG BZ - Online-Workshop - Degradation/Lebensdauer von PEM-Brennstoffzellen, 18.5.2021
- / Wilhelm F., Scholta J., Jörissen L.; **Investigations on pressure drop in the flow field channels of a PEMFC due to liquid water**; 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- / Witte W., Hariskos D., Paetel S., Maiberg M. (Univ. Halle-Wittenberg), Zahedi-Azad S. (Univ. Halle-Wittenberg), Pistor P. (Univ. Halle-Wittenberg), Kempa H. (Univ. Halle-Wittenberg), Scheer R. (Univ. Halle-Wittenberg), Hauschild D. (KIT), van Maris V. (KIT), Blankenship M. (UNLV), Weinhardt L., (KIT), Heske C. (KIT), Keutgen J. (RWTH), Cojocar-Miré-din O. (RWTH), Ghorbani E. (TU Darmstadt), Albe C. (TU Darmstadt), et al. **CIGS devices with increased bandgap energy: Results of the EFF-CIS project**; 38th EU PVSEC 2021, online, 6-10 Sept. 2021
- / Witte W., Hempel W., Paetel S., Menner R., Hariskos D.; **Sputtered gallium oxide applied to the front side of Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells**; 2021 Virtual MRS Spring Meeting & Exhibit, 17-23 April 2021
- / Yazili D., Marini E., Jörissen L., Saatkamp T. (MPI-FKF), Münchinger A. (MPI-FKF), Kreuer K. (MPI-FKF), Titvinitze G. (Agr. Univ. of Georgia), Schuster M. (Fumatech), Schare C. (Hahn-Schickard); **Sulfonated polyphenylene sulfone blend membranes finding their way into proton exchange membrane fuel cells**; 17th UECT - Ulm Electrochemical Talks 2021, Ulm, 22-23 Nov. 2021
- Zillner J., Ahlswede E., Powalla M.; **Strategy toward MA-free and PEDOT:PSS free Sn-Pb mixed perovskite solar cell devices**; Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV21), online, 24-28 May 2021
- / Zuberbühler U., Löffler M., Stürmer B., Schmidt M.; **CO₂-Abscheidung und synthetische Kraftstoffe auf dem Weg zur Klimaneutralität**; Ausschusssitzung IHK Schwaben, Arbeitskreis Umwelt und Energie, online, 10.11.2021

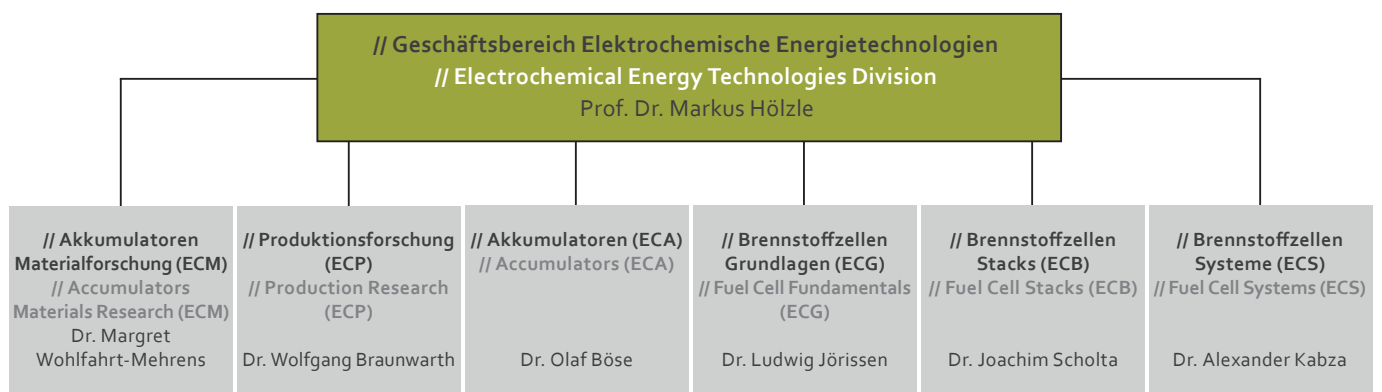
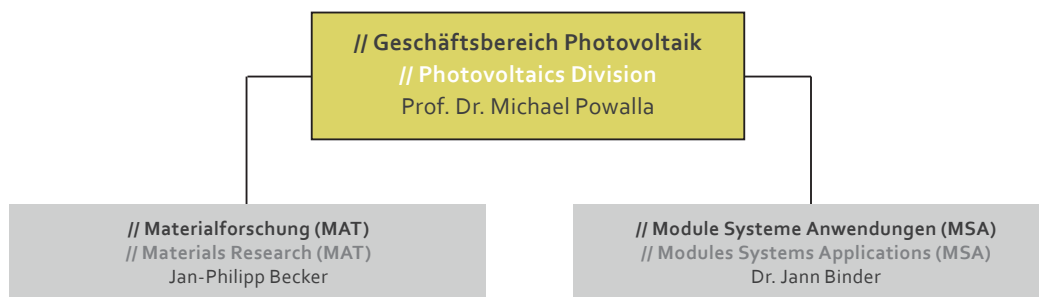
// Organigramme

Organisational Structure

// ORGANIGRAMM DES INSTITUTS ZSW ORGANISATIONAL CHART



// ORGANIGRAMME DER GESCHÄFTSBEREICHE
// DEPARTMENTAL STRUCTURE



// Standorte

Locations

// STUTT GART



Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart

// SOLARTESTFELD WIDDERSTALL



Widderstall 14
89188 Merklingen

// WINDTESTFELD SCHWÄBISCHE ALB



// ULM



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

// ULM ELAB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

// ULM HYFAB



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

// 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 e. V.
Cluster BZ BW	Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg
CPN	Clean Power Net
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	The European Sustainable Phosphorus Platform
EUREC	The Association of European Renewable Energy Centres
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
H2 Süd	H2 Süd e. V. – Die Wasserstoff-Initiative Bayern & Baden-Württemberg
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
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.
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDMA	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süddeutschland

// Impressum
// Imprint

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

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

E-mail: info@zsw-bw.de
Internet: www.zsw-bw.de

// Redaktion Editors
Petra Nikolić (verantwortlich)
Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Gudrun Scherg
Ulrike Witt

// Layout & Satz Layout & Setting
Sieber & Wolf Werbeagentur
Hofgut Mauer 1
70825 Korntal-Münchingen
www.sieberundwolf.de

// Übersetzungen Translation
Elisabeth Noske
www.PEN-Uebersetzungen.de
Gillian Christine Gingell
www.dze-translations.com

// Druck Print
printmedia solutions GmbH
Weinheimer Str. 62
68309 Mannheim
www.printmedia-solutions.de

//Fotos Photographs
Harald Dietz, Ellen Klose
Alexander Fischer /
Leybold GmbH
Adobe Stock
Fraunhofer IAO
picture alliance / dpa



Der Jahresbericht wurde
klimaneutral mit
Cradle-to-Cradle-,
Blauer-Engel- sowie
FSC-Zertifizierung und
mit Farben auf Pflanzen-
ölbasis nach DIN ISO
12647-2 gedruckt.
This annual report
was printed on FSC-
certified paper.

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