ZSW 2023

Jahresbericht
Annual Report

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

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

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

INHALT
CONTENTS

4 Vorwort / Foreword
5 Stiftung / Foundation
6 Leitbild / Our Mission

10 **Erfolge 2023 / 2023 Success Stories**

16 **Schwerpunktbericht / Focus Report**
16 Windenergietestfeld / Wind Energy Test Site

30 **Fachgebiete & Forschungsprojekte / Departments and Research Projects**
32 Systemanalyse / Systems Analysis
36 Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
40 Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
44 Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
48 Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
52 Produktionsforschung / Production Research
56 Akkumulatoren / Accumulators
58 Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
62 Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
66 Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems

68 **Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations**
70 Impressionen 2023 / Impressions 2023
74 Sichtbarkeit / Visibility
75 Mitgliedschaften / Memberships

76 **Dokumentation / Documentation**
78 Finanzbericht / Financial Information
79 Personalentwicklung / People Development
80 Organisationsstruktur / Organisational Structure
81 Standorte / Locations
82 Bildnachweis / Picture Credits
82 Impressum / Imprint

VORWORT
FOREWORD

Von der Weltklimakonferenz in Dubai wurde das Ziel formuliert, die Kapazität erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2030 zu verdreifachen. Parallel wurde im Trilog zum Net Zero Industry Act für die EU beschlossen, die Schlüsseltechnologien für die Klimaneutralität auf eine neue industrielle Basis zu stellen. Das ZSW möchte dafür relevante Beiträge leisten, zumal wir in den meisten der strategischen Technologiefelder mit unserer Forschung zuhause sind.

Ein Beispiel ist die Windenergienutzung an Land, der unser diesjähriger Schwerpunktbericht gewidmet ist. Denn 2023 wurde am ZSW das weltweit erste Windenergie-Forschungstestfeld in komplexem Gelände eröffnet. Weitere Höhepunkte waren die Entwicklung von leistungsfähigen flexiblen Perowskit-Solarzellen mit umweltfreundlichen Lösungsmitteln sowie von wasserbasierten, PFAS-freien Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien. Ebenso wurde die Forschungsfabrik HyFaB erfolgreich fertiggestellt, die sich der Prozessentwicklung für die Großserienfertigung von Brennstoffzellen widmet. Zusätzlich wurde die Test- und Analytik-Infrastruktur für Elektrolyseure deutlich ausgebaut.

Das Interesse der Öffentlichkeit an unseren Forschungsarbeiten ist groß. Dieser Erfolg ist vor allem das Verdienst aller Mitarbeitenden am ZSW, für deren großartigen Einsatz wir uns herzlich bedanken. Unser Dank geht auch an die Mitglieder des Kuratoriums und den Vorsitzenden Professor Christian Mohrdieck.

Für die finanzielle Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit danken wir dem Land Baden-Württemberg sowie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

Allen Leserinnen und Lesern unseres Jahresberichts wünschen wir eine interessante Lektüre!

The target formulated at the international climate change conference in Dubai was to triple the capacity of renewable sources of energy by 2030. The decision taken in parallel in the trilogue negotiations on the Net-Zero Industry Act for the EU was to form a new industrial base for the key technologies for climate neutrality. The ZSW would like to make relevant contributions to this end, especially since we have a stake in most of the strategic fields of technology in our research.

One example is the use of onshore wind energy, which is the theme of our Focus Report this year. The world's first wind energy research test site in complex terrain was inaugurated at the ZSW in 2023. Other highlights included the production of powerful and flexible perovskite solar cells with environmentally-friendly solvents and of water-based, PFAS-free lithium-ion battery electrodes, the completion of the HyFaB research factory for the development of processes for the large-scale production of fuel cells, and the considerable expansion of the test and analysis infrastructure for electrolysers.

Our research work is of great interest to the public. All the employees at the ZSW are most deserving of the credit for this success and the attention we receive, and we would like to express our sincere gratitude for their hard work and commitment. We would also like to thank the members of the Board of Trustees and its Chair, Professor Christian Mohrdieck. Thanks are also due to the state of Baden-Württemberg for the financial support and excellent cooperation, and to our partners from enterprise, public research funding and science.

We hope everyone will enjoy reading our Annual Report and find it interesting!

Der Vorstand des ZSW (von links nach rechts): Prof. Dr. Markus Hölzle, Prof. Dr. Frithjof Staiß, Prof. Dr. Michael Powalla

ZSW Board of Directors (from left to right): Prof. Dr. Markus Hölzle, Prof. Dr. Frithjof Staiß, Prof. Dr. Michael Powalla

Mitglieder des Kuratoriums:

Members of the Board of Trustees:

STIFTUNG
FOUNDATION

Das ZSW-Gebäude in Stuttgart.

The ZSW building in Stuttgart.

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

Stiftungsauftrag:
»Die Stiftung verfolgt den Zweck, Forschung und Entwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien, Energieeffizienz, Energiewandlung und Energiespeicherung, insbesondere auf dem Gebiet der Sonnenenergie und Wasserstofftechnologie, in Abstimmung mit der universitären und außeruniversitären Forschung sowie durch Umsetzung der erarbeiteten Ergebnisse in die industrielle Praxis zu betreiben und zu fördern.«

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 universitary and non-universitary 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.)

LEITBILD

// ENERGIE MIT ZUKUNFT

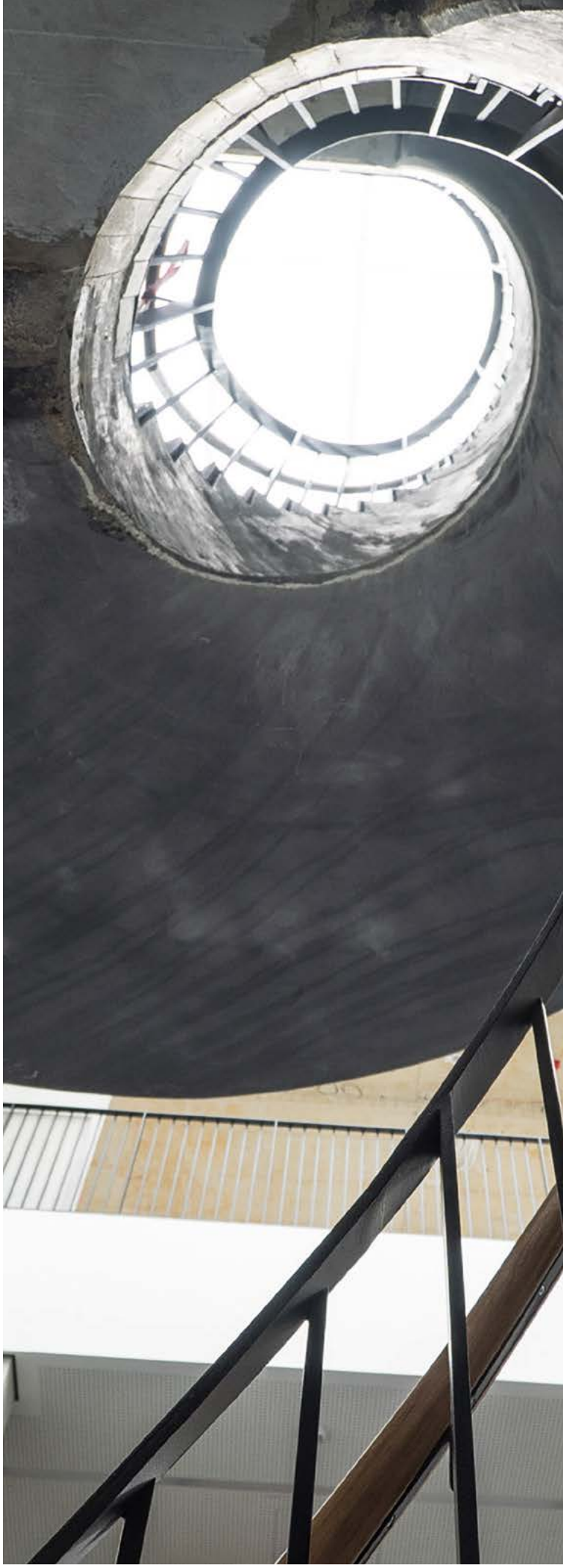
Ohne Energie kein Fortschritt, ohne Energie keine Prosperität. Energie ist Treiber für Innovationen und selbst Gegenstand von Innovationen. Das Leitbild der Klimaneutralität ist untrennbar mit der Nutzung erneuerbarer Energien, der Steigerung der Energieeffizienz und dem Denken in Stoffkreisläufen verbunden.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

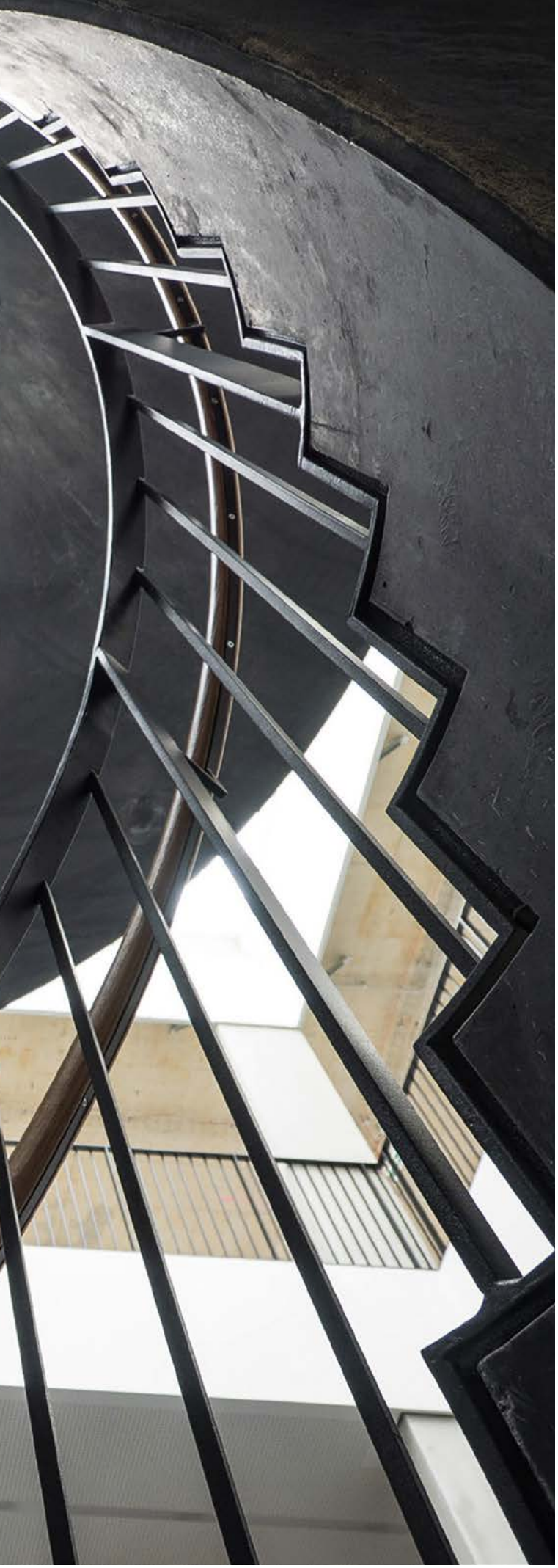
// WISSENSCHAFT MIT KLAREM FOKUS

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

// TECHNOLOGIETRANSFER SCHAFFT ARBEITSPLÄTZE

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





OUR MISSION

// ENERGY IS OUR FUTURE

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

// SCIENCE IS OUR POWER

We are among the leading research institutions in our respective fields, allowing us to compete at international level and achieve success in developing a range of key technologies and rolling them out in the marketplace. Linking the disciplines of science, engineering and economics is central to the work at the ZSW.

// INNOVATION IS OUR STRENGTH

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

// 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

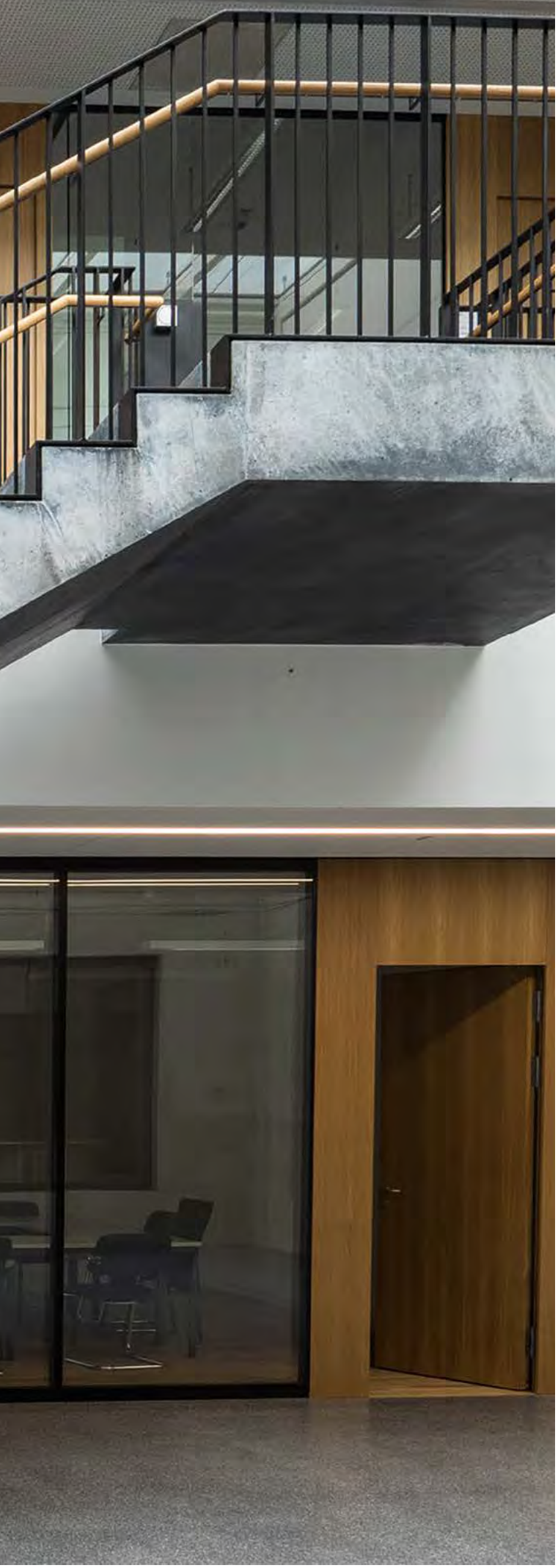
Die Leistungsfähigkeit des ZSW basiert auf einer hohen fachlichen Qualifikation und Motivation aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die gelebte Wertschätzung des Einzelnen, der kollegiale Umgang miteinander und transparente Entscheidungsprozesse sind zentrale Elemente unseres Selbstverständnisses.

// DEM GANZEN VERPFLICHTET

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

// AKTEURE NEUTRAL INFORMIEREN

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



// QUALITY IS OUR WATCHWORD

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

// TEAMWORK IS OUR BOND

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

// ENVIRONMENTAL PROTECTION IS OUR CONCERN

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

// KNOWLEDGE IS OUR FORCE

The subjects on our research agenda are complex. This is why we seek transparency and neutrality in the way in which we deliver information to the industrial, political and social arenas. Our goal is to facilitate understanding and evaluation of new technologies and, in doing so, win support for their practical application and help shape the energy supply of the future.

ERFOLGE

SUCCESS STORIES 2023

Innovationen für eine klimaneutrale Energieversorgung sind das Metier des ZSW. Nicht immer ist der Weg zu neuen Erkenntnissen gradlinig, denn oft müssen bestehende Denkansätze geprüft, revidiert und durch neue ersetzt werden. Umso erfreulicher ist es, wenn es gelingt und Erfolge auch von unseren Partnern, der Politik und der Öffentlichkeit gewürdigt werden. Einige Beispiele aus den Forschungsfeldern des ZSW im Jahr 2023 stellen wir hier exemplarisch vor.

The ZSW is in the business of developing innovations for a climate-neutral energy supply. The path to new insights is not always straight because existing ways of thinking often have to be questioned, revised and replaced by new approaches. It is all the more gratifying when the process succeeds and achievements are also recognised by our partners, politicians and the general public. Some of the subjects researched by the ZSW in 2023 are featured here by way of example.

// POWDER-UP!-BAUARBEITEN ABGESCHLOSSEN

Ein Meilenstein für das Kathodentechnikum »Powder-Up!« war das Richtfest für den 2.400 m² großen Neubau am 29. Juni. Mit Powder-Up! wird erstmals die industrieunabhängige und nachhaltige Produktion von Batteriematerialien in Mengen von bis zu 100 kg ermöglicht. Die neue Anlage in Ulm wird maßgeschneiderte Kathodenpulver für die Prozessentwicklung zur Verfügung stellen und Daten liefern, um alle Produktionsschritte weiter zu optimieren. Das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg stellt 10 Millionen Euro für den Neubau zur Verfügung, während die Pilotanlagen vom Bundesforschungsministerium mit etwa 20 Millionen Euro finanziert werden. Dieses Förderprojekt stärkt nicht nur die Batterieforschung an sich, sondern auch Deutschlands Position im innovativen Maschinenbau. Powder-Up! wird dadurch eine Schlüsselposition in Deutschland bei der Weiterentwicklung von Batterien einnehmen.

// POWDER-UP! CONSTRUCTION WORK COMPLETED

The topping-out ceremony for the new 2,400 m² building on 29 June was a milestone for the »Powder-Up!« cathode pilot plant. Powder Up! will for the first time enable the sustainable production of battery materials in quantities of up to 100 kg independent of any particular industry. The new facility in Ulm will provide customised cathode powders for process development and will deliver data for the further optimisation of all the production steps. The Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs has earmarked 10 million euro for the newbuild while the pilot plants are being financed by the Federal Ministry of Education and Research to the tune of around 20 million euro. This project will not only promote battery research per se but it will also strengthen Germany's position in innovative mechanical engineering. Powder Up! will therefore play a key role in Germany in the further development of batteries.

Powder-Up! Neubau.

Powder-Up! New building.

HyFaB-Neubau: Montagehalle und Seminartrakt.

New HyFaB building: assembly hall and seminar wing.

// HYFAB: IMPLEMENTIERUNG VON PROZESSEN FÜR DIE GROSSSERIENFERTIGUNG VON BRENNSTOFFZELLEN

Seit 2021 entwickelt das ZSW in Ulm auf 6.600 Quadratmetern die Forschungsfabrik für Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellentechnik HyFaB. Hauptaufgabe ist es, die Voraussetzungen und Prozesse für die Großserienfertigung von Brennstoffzellen zu schaffen. Der zweite Bauabschnitt mit Montagehalle und Seminartrakt, der aus Europäischen Fördermitteln finanziert wurde, ist seit April 2023 fertiggestellt. Seither fanden bereits mehrere Industrieveranstaltungen mit Experten aus der Brennstoffzellenszene statt. Der Maschinenpark soll bis 2024 vollständig in Betrieb genommen werden. Bis 2030 werden über 50 Millionen Euro am ZSW-Standort Ulm in das Projekt investiert, um der emissionsfreien Antriebstechnologie auf Wasserstoffbasis den Weg in den Markt zu ebnen.

// HYFAB: IMPLEMENTATION OF PROCESSES FOR MASS PRODUCTION OF FUEL CELLS

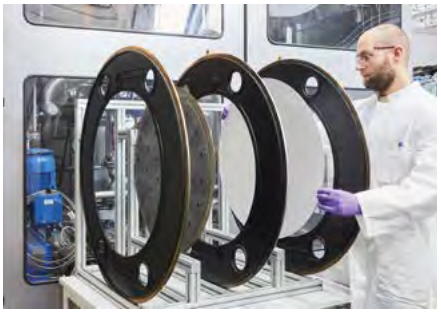
The ZSW has been developing the HyFaB research factory for hydrogen and fuel cell technology on a site measuring 6,600 square metres in Ulm since 2021. The main aim is to create the conditions and processes for the mass production of fuel cells. The second construction phase ended in April 2023 with the completion of an assembly hall and seminar wing, financed with European funds. Several industry events have been held there since then, attended by experts from the fuel cell sector. The machinery is scheduled to be fully operational by 2024. Over 50 million euro will be invested in the project at the ZSW site in Ulm by 2030 in order to pave the way to market for emission-free hydrogen-based drive technology.

// ELEKTROLYSE-TESTKAPAZITÄTEN VERDOPPELT

Im Herbst 2023 wurde das Infrastrukturprojekt »HyGenLab« im Fachgebiet REG abgeschlossen, mit dem insbesondere neue Testmöglichkeiten und Prüfstände für Elektrolysestacks und Elektrolysekomponenten im Bereich der Alkalischen Elektrolyse geschaffen wurden. Die Bandbreite reicht von der Elektrodencharakterisierung bis zu einem Prüfstand für Elektrolysestackdesigns im multi-MW-Maßstab. Die bestehenden Testkapazitäten konnten damit mehr als verdoppelt werden. Das Projekt wurde vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg mit insgesamt vier Millionen Euro gefördert. Die Nachfrage von Industriekunden nach Komponenten- und Stacktests steigt nach wie vor signifikant an, so dass ein kontinuierlicher Ausbau der Testmöglichkeiten geplant ist.

// ELECTROLYSIS TEST CAPACITY DOUBLED

The »HyGenLab« infrastructure project was completed in the department of Renewable Fuels and Processes (REG) in autumn 2023, resulting most notably in new trial facilities and test rigs for electrolysis stacks and electrolysis components in the field of alkaline electrolysis, ranging from electrode characterisation right through to a test rig for electrolysis stack designs on a multi-MW scale and more than doubling the existing test capacity. The project attracted funds from the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs totalling four million euro. The demand from industrial customers for component tests and stack tests continues to increase significantly, precipitating plans for a continuous expansion of test facilities.



Testmöglichkeiten und Prüfstände für Elektrolysestacks.

Test rigs for electrolysis stacks.

// KI-CHAMPION 2023

Das KI-Team aus dem Fachgebiet Systemanalyse erhielt als einer von neun Preisträgern den Award »KI-Champion BW 2023« für die Entwicklung des BirdRecorders als »herausragendes, innovatives Beispiel für anwendungsorientierte Lösungen im Bereich Künstlicher Intelligenz«. Der BirdRecorder ist ein KI-basiertes System, das windkraftrelevante, gefährdete Vogelarten im Gefährdungsbereich von Windenergieanlagen erkennt, um im Bedarfsfall eine Kollision durch Abschalten der Windenergieanlagen zu verhindern. Der BirdRecorder wurde im Jahr 2022 erstmals unter Realbedingungen getestet. Für das Frühjahr 2024 ist die Validierung nach einem von der Schweizerischen Vogelwarte entwickelten Standard vorgesehen. Damit ist der BirdRecorder das erste Antikollisionssystem mit »KI Made in BW«, das nach diesem Standard validiert sein wird. Die Validierung erfolgt mit Unterstützung des Umweltministeriums Baden-Württemberg auf dem Windenergie-Forschungstestfeld WINSENT des ZSW.

// AI CHAMPION 2023

The AI team from the Systems Analysis department was one of nine winners of the »AI Champion BW 2023« award for the development of the BirdRecorder as an »outstanding and innovative example of practical applications in the field of artificial intelligence«. The BirdRecorder is an AI-based system which is designed to detect endangered bird species and to prevent collisions in the danger zone of wind turbines by switching off the wind turbines as and when necessary. The BirdRecorder was tested in real conditions for the first time in 2022. It is due to be validated in the spring of 2024 with reference to a standard developed by the Swiss Ornithological Institute. The BirdRecorder will then be the first anti-collision system with »AI Made in BW« that will be certified as conforming to this standard. The validation will be carried out on the ZSW WINSENT wind energy research test site with the support of the Baden-Württemberg Ministry of the Environment.

// FLEXIBLE PEROWSKITSOLARZELLEN ERZIELEN MIT UMWELTFREUNDLICHEN LÖSEMITTELN ÜBER 15 % WIRKUNGSGRAD

Ein wichtiger Schritt hin zur Kommerzialisierung von Perowskitsolarzellen ist die Umsetzung einer großflächigen Herstellung mit industrierelevanten Prozessen und Materialien. Am ZSW wurden hierzu bis auf den Front- und Rückkontakt alle Funktionsschichten mittels eines Rolle-zu-Rolle-tauglichen Schlitzdüsenverfahrens aufgebracht, welches sich aufgrund des besonders geringen Materialverbrauchs und einer hervorragenden Skalierbarkeit anbietet. Eine weitere Besonderheit lag in der Verwendung eines »grünen« Lösemittels für die Perowskit-Vorläuferschicht anstelle der sonst üblicherweise verwendeten umwelt- oder gesundheitsbedenklichen Lösemittel. Der erzielte Wirkungsgrad von 15 % für eine flexible Solarzelle stellt hinsichtlich der genannten Abscheidebedingungen einen Rekord dar, bietet jedoch durch weitere Verbesserungen, z. B. die Verwendung optimierter Elektroden, noch viel Steigerungspotenzial.

// FLEXIBLE PEROVSKITE SOLAR CELLS ACHIEVE OVER 15 % EFFICIENCY USING ENVIRONMENTALLY-FRIENDLY SOLVENTS

One important step towards the commercial viability of perovskite solar cells is the wider roll-out of manufacturing using processes and materials on an industrial scale. All the functional layers, with the exception of the front and back contacts, were applied at the ZSW using a slot die coating method suitable for roll-to-roll processes, which is ideal due to the extremely low material consumption and excellent scalability. Another point of note was the use of a »green« solvent for the perovskite precursor layer instead of the otherwise commonly used solvents that are harmful to the environment or health. The resulting efficiency of 15 % for a flexible solar cell is a record in terms of the aforementioned deposition conditions but is still open to further improvements, e.g. the use of optimised electrodes, in order to exploit yet more potential.

Preisverleihung KI-Champion BW 2023 mit Ministerin Hoffmeister-Kraut.
AI Champion BW 2023 award ceremony with government minister Hoffmeister-Kraut.

Herstellung flexibler Perowskitsolarzellen mittels Schlitzdüsenabscheidung.
Production of flexible perovskite solar cells using slot die coating.

Über 80 Teilnehmende trafen sich in Stuttgart am ZSW. / Over 80 delegates met in Stuttgart at the ZSW.

// INDUSTRIE UND FORSCHUNG KAMEN BEIM 2. PEROWSKIT-WORKSHOP BADEN-WÜRTTEMBERG ZUSAMMEN

Am 4. Oktober fand am ZSW in Stuttgart der 2. Perowskit-Workshop Baden-Württemberg statt. Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Industrie waren anwesend, um von Anfang an in den Hochskalierungsprozess für diese Technologie eingebunden zu werden. Das ZSW, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das Institut für Photovoltaik der Universität Stuttgart sowie das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme und andere Teilnehmende aus baden-württembergischen Universitäten setzten dabei die ersten Impulse. Am Nachmittag stellten sich Firmen aus ganz Deutschland vor, die in Zukunft bei der Hochskalierung mitwirken möchten und eigene Produkte und Komponenten sowie Produktionsequipment entwickeln. Zahlreiche Teilnehmende aus Baden-Württemberg zeigten großes Interesse an der zukunftsweisenden Technologie, weshalb der Workshop zeitnah in die dritte Runde gehen wird.

// MEETING OF INDUSTRY AND RESEARCH AT THE 2ND BADEN-WÜRTTEMBERG PEROVSKITE WORKSHOP

The 2nd Baden-Württemberg Perovskite Workshop was held at the ZSW in Stuttgart on 4 October. Representatives from science and industry were present in order to be involved in the upscaling process for this technology from the very beginning. The ZSW, the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), the Institute for Photovoltaics at the University of Stuttgart, the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems and other delegates from Baden-Württemberg universities were there to get the ball rolling and stimulate ideas. Companies from all over Germany introduced themselves in the afternoon, keen to play a part in the future upscaling and eager to develop their own products, components and production equipment. Numerous delegates from Baden-Württemberg showed great interest in the forward-looking technology, prompting plans for the third workshop in the near future.

// LITHIUM-IONEN-BATTERIEN PFAS-FREI HERSTELLEN

Moderne Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien bestehen aus nickelhaltigen Kathoden und erfordern bislang giftige Lösungsmittel sowie fluorhaltige Chemikalien bei der Herstellung. Das ZSW hat bedeutende Fortschritte in der umweltfreundlichen Herstellung von Elektroden für solche Batterien erzielt. Im Rahmen der Forschung wurden das Standardlösemittel NMP und das Bindergemisch PVDF erfolgreich durch wässrige Formulierungen ersetzt, was neben ökologischen Vorteilen auch zu einer Kostenreduktion bei der Zellherstellung führt. Es konnte ein kostengünstiges und industrietaugliches Verfahren entwickelt werden, um Elektroden mit bis zu 100 Metern Länge herzustellen. Die Arbeiten hatten im Millimeterbereich begonnen. Erstmals konnten auch komplette Batteriezellen im Format 21700 mit den hergestellten Elektrodenbändern produziert werden. Eine Übertragung dieses Verfahrens auf andere Zellformate ist geplant.

// PRODUCING LITHIUM-ION BATTERIES PFAS-FREE

Modern high-performance lithium-ion batteries consist of nickel-rich cathodes and require toxic solvents and fluorine-containing chemicals during production up to now. The ZSW has made significant progress in the environmentally friendly production of electrodes for such batteries. As part of the research, the standard solvent NMP and the binder mixture PVDF have been successfully replaced by aqueous formulations, which, in addition to ecological advantages, also leads to a reduction in costs in cell production. A cost-effective process suitable for industrial use to produce electrodes up to 100 metres in length has been developed. Work has begun in the millimetre range. For the first time, it has also been possible to produce complete battery cells in the 21700 format using the manufactured electrode strips. There are plans to transfer this process to other cell formats.

FOCUS REPORT

WINDENERGIETESTFELD
WIND ENERGY TEST SITE

KLIMASCHUTZ HEISST WIND-ENERGIE

CLIMATE PRO-TECTION MEANS WIND ENERGY

Die Weltklimakonferenz COP28 in Dubai im Dezember 2023 hat ein weiteres Mal gezeigt, wie schwer globale Verständigungen über notwendige Maßnahmen sind, die die Menschheit auf den so genannten 1,5-Grad-Pfad zur Einhaltung des Pariser Klimaabkommens gelangen lassen. So lässt die Abschlusserklärung der Konferenz vieles vermissen, was aus Sicht der Wissenschaft konkret notwendig wäre. Eine Ausnahme bilden jedoch die Zielsetzungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Hierzu fordert die COP28, die Leistung erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2030 weltweit zu verdreifachen. Einen ähnlich lautenden Beschluss hatten bereits die G7-Staaten im Sommer 2023 gefasst.

Diese Zielsetzung bedeutet einen Zubau von durchschnittlich 1.000 Gigawatt elektrischer Erzeugungsleistung jährlich und deckt sich mit dem, was die Internationale Agentur für erneuerbare Energien, IRENA, in ihrem jüngsten World Energy Transition Outlook als notwendig für das Erreichen der Pariser Klimaziele angibt. Im Jahr 2030 müssen demnach fast 70 % der globalen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Den größten Beitrag leisten die Photovoltaik und Windenergie an Land zu etwa gleichen Anteilen, wobei ihre Bedeutung im Zeitraum danach weiter deutlich ansteigt.

Die internationale Zielsetzung der COP28 ist kompatibel mit den bereits implementierten Strategien auf EU- und nationaler Ebene. So soll nach dem deutschen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) die Stromerzeugung bis zum Jahr 2030 zu mindestens 80 Prozent und fünf Jahre später nahezu vollständig aus erneuerbaren Energien erfolgen. Die wichtigsten Säulen der Stromerzeugung sind auch bei uns die Photovoltaik und Windenergienutzung an Land. So wird für die Zielerreichung in den nächsten Jahren bei Wind an Land die jährliche Neuinstallation einer Leistung von 10 Gigawatt notwendig sein – etwa dreimal so viel wie im Jahr 2023 realisiert wurde.

The COP28 international climate change conference in Dubai in December 2023 showed once again how difficult it is to reach consensus on the measures required to put humanity on the 1.5-degree pathway in compliance with the Paris Agreement on climate targets. The final declaration at the conference lacks much, for example, when it comes to many specific necessities from a scientific perspective, but the goals for the expansion of renewable sources of energy are an exception in that COP28 is calling for worldwide renewable energy capacity to be tripled by 2030. The G7 countries had already adopted a similar resolution in the summer of 2023.

This target means an average increase of 1,000 gigawatts of electric generating capacity per year and is in line with the amount said to be necessary to achieve the Paris climate goals by the International Renewable Energy Agency, IRENA. According to its latest World Energy Transitions Outlook, almost 70 % of global electricity will have to be generated from renewable sources of energy in 2030. Photovoltaics and onshore wind energy will contribute the most in roughly equal proportions, and their prominence will continue to increase significantly in the period thereafter.

The international COP28 target is compatible with the strategies already adopted at EU and national levels. Under the German Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG), for example, renewable sources of energy should account for at least 80 per cent of electricity generation by 2030 and almost all of it five years later. Here too, the main pillars of electricity generation are photovoltaics and the use of onshore wind energy. In order to achieve the target, it will therefore be necessary to see new onshore wind installations providing 10 gigawatts of power every year in the next few years – around three times as much as in 2023.

<< Wissenschaftler des ZSW-Teams Windenergie bestimmen die Eigenfrequenz eines Rotorblatts.
<< Scientists of the ZSW-Team Wind Energy determine the natural frequency of a rotor blade.

< Die beiden Forschungswindenergieanlagen und einer der vier Messmasten des WINSENT Testfelds.
< The two research wind turbines and one of the four measuring masts of the WINSENT test site.

// WINDENERGIENUTZUNG RÜCKT INS BERGLAND VOR

Verschiedene Studien zeigen, dass mindestens ein Fünftel der zukünftigen Windenergieleistung an Land in bergig-komplexem Gelände errichtet werden muss. Das bedeutet weltweit Zubauraten von mehr als 60 Gigawatt jährlich in komplexen Geländestrukturen, was in etwa der Windenergieleistung entspricht, die heute insgesamt in Deutschland installiert ist.

Analog zum Trend, dass die Erschließung neuer Windenergiestandorte weltweit mehr und mehr fern der Küsten in komplexem Gelände erfolgen wird, wird die Windenergienutzung auch in Deutschland zunehmend von den Küstenregionen und der norddeutschen Tiefebene in Richtung der Mittelgebirgsregionen vorrücken. Dies ist folgerichtig inzwischen auch im so genannten Windenergieflächenbedarfsgesetz verankert, das eine Bereitstellung von zwei Prozent der Bundesfläche für die Windenergienutzung festschreibt und dies auch auf die Bundesländer herunterbricht.

Doch mit der Windenergienutzung in bergigen Topografien sind neue technische Herausforderungen verbunden, die sich unter anderem aus der mechanischen Beanspruchung der Anlagen in Folge deutlich komplexerer Strömungsverhältnisse als im Flachland ergeben. Zentrale Fragestellungen sind somit: Wie müssen Windenergieanlagen konstruiert und wie sollten sie betrieben werden, damit die erhöhte Beanspruchung durch unstete und mit stärkeren Verwirbelungen verbundene Winde nicht zu einer vorzeitigen Materialermüdung und damit kürzeren Lebensdauer von Windenergieanlagen führt? Dies ist nicht zuletzt eine entscheidende ökonomische Frage, denn mit den prognostizierten Ausbauvolumina sind allein für die Windenergie in komplexen Topografien weltweite Investitionen von jährlich mehr als 100 Milliarden US-Dollar verbunden.

// WIND ENERGY USE IS MOVING TO THE UPLANDS

Various studies show that at least one fifth of the future onshore wind energy capacity will have to be based in complex mountainous terrain. This will mean expanding worldwide at a rate of more than 60 gigawatts per year in complex terrain, which roughly corresponds to the total wind energy capacity installed in Germany today.

In line with the global trend towards the increasing development of new wind energy sites far from the coast in complex terrain, the use of wind energy in Germany will move progressively from the coastal regions and the North German lowlands to the central uplands. Consequently, this is now anchored in the so-called Wind Energy Area Requirements Act, an act stipulating that two per cent of the country should be made available for wind energy use (Windenergieflächenbedarfsgesetz – WindBG), broken down by federal state.

The use of wind energy in mountainous topography brings new technical challenges, arising from such factors as the mechanical stress on the systems as a result of far more complex flow conditions than in flatlands. The central questions which must therefore be answered are how wind turbines should be designed and how they should be operated so that the increased stress caused by the changes in wind force and the greater turbulence do not lead to premature material fatigue, thereby shortening the service life of wind turbines. This is a crucial economic question, not least because the forecast expansion volumes will mean global investments of more than 100 billion US dollars a year for wind energy in complex topographies alone.

Ultraschallprüfung der Gussnaben in der Montagehalle in Königsbronn.

Ultrasonic testing of the cast hubs in the assembly hall in Königsbronn.

// WINSENT ALS WELTWEIT EINZIGARTIGE FORSCHUNGS-, ENTWICKLUNGS- UND TESTPLATTFORM

Im Süddeutschen Windenergieforschungscluster WindForS, dem 25 Institute an sieben Forschungsreinrichtungen und Universitäten angehören, reifte deshalb bereits seit dessen Gründungsjahr 2010 die Idee eines Forschungstestfelds, das es erlaubt, die aufgeworfenen Fragen detailliert zu untersuchen und Lösungen für den Einsatz der Windenergie in komplexem Gelände zu entwickeln. Dies nicht zuletzt, um der in Süddeutschland ansässigen Industrie neue Chancen zur Erschließung von Wertschöpfungspotenzialen im Bereich der Windenergie zu eröffnen. Im Rahmen des vom Bund geförderten Vorhabens »KonTest« wurde deshalb dieses weltweit einzige Testfeld in bergig-komplexem Gelände in den Jahren 2013 bis 2015 wissenschaftlich konzipiert. Es besteht im Kern aus zwei 100 Meter hohen, oberhalb einer Geländesteilstufe errichteten Forschungs-Windenergieanlagen und vier Windmessmasten gleicher Höhe, die in Hauptwindrichtung vor und hinter den Windenergieanlagen platziert sind. In einer ganz Bayern und Baden-Württemberg umfassenden Ausschreibung, in deren Rahmen sich Kommunen aktiv bewarben, wurde hierfür ein geeigneter Standort gesucht und am Stöttener Berg auf den Gemarkungen der Städte Geislingen an der Steige und Donzdorf auf der Schwäbischen Alb gefunden, der ein perfektes Umfeld bietet.

Zu dieser Zeit haben wir uns als ZSW entschieden, mit der Windenergienutzung einen neuen Forschungsbereich zu erschließen und im Einvernehmen mit den WindForS-Partnern die Planung und Realisierung des Windenergie-Forschungstestfelds WINSENT (»Wind Science and Engineering Test Site in Complex Terrain«) sowie dessen anschließenden Betrieb zu übernehmen. Für die Realisierung wurden im Zuge des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Verbundprojekts »WINSENT« und des vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft geförderten Landesprojekts »WINSENT-BW« Mittel in Höhe von rund 13 Millionen Euro bereitgestellt.

// WINSENT RESEARCH, DEVELOPMENT AND TESTING PLATFORM WITHOUT PARALLEL ANYWHERE IN THE WORLD

Based in southern Germany, the WindForS wind energy research cluster numbers 25 institutes at seven research establishments and universities and has been exploring the idea of a research test site since it was set up in 2010. This is with a view to allowing the matters arising to be examined in detail and enabling solutions for the use of wind energy in complex terrain developed. This is not least in order to open up new opportunities for the industry based in southern Germany to tap into value creation potential in the wind energy sector. This prompted the idea for this unique scientific test site in complex mountainous terrain, without parallel anywhere in the world, and its realisation in the government-funded »KonTest« project between 2013 and 2015. It essentially consists of two 100-metre high research wind turbines, built above an escarpment, and four wind measurement masts of the same height, placed in front of and behind the wind turbines in the prevailing wind direction. The search was on for a suitable location and one was found in a call for tenders from local authorities across the whole of Bavaria and Baden-Württemberg in which the Stöttener Berg on the outskirts of the towns of Geislingen an der Steige and Donzdorf in the Swabian mountains was believed to offer the perfect environment.

We decided back then that it was time for the ZSW to look into the use of wind energy as a new field of research and agreed, in consultation with the WindForS partners, to plan and establish the wind energy research test site WINSENT (»Wind Science and Engineering Test Site in Complex Terrain«) and to take charge of its subsequent operation. Funds amounting to around 13 million euro were granted for the venture under the auspices of the joint »WINSENT« project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) and the »WINSENT-BW« project funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector.

Das ZSW ist aber viel mehr als Planer und Betreiber des Testfelds, nämlich auch selbst Hersteller der beiden Windenergieanlagen. Wir verfügen über sämtliche Konstruktionsdaten und haben Zugriff auf jedes Detail, so dass Umbauten, der Austausch von Komponenten oder Änderungen der Betriebsweise ohne Gestattung eines externen Herstellers jederzeit möglich sind. Dies ist ein weiteres Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen Testfeldern und erlaubt es, Innovationskonzepte aus Forschung und Industrie unmittelbar in der Praxis zu erproben. Das Testfeld dient somit auch als Innovationsbeschleuniger.

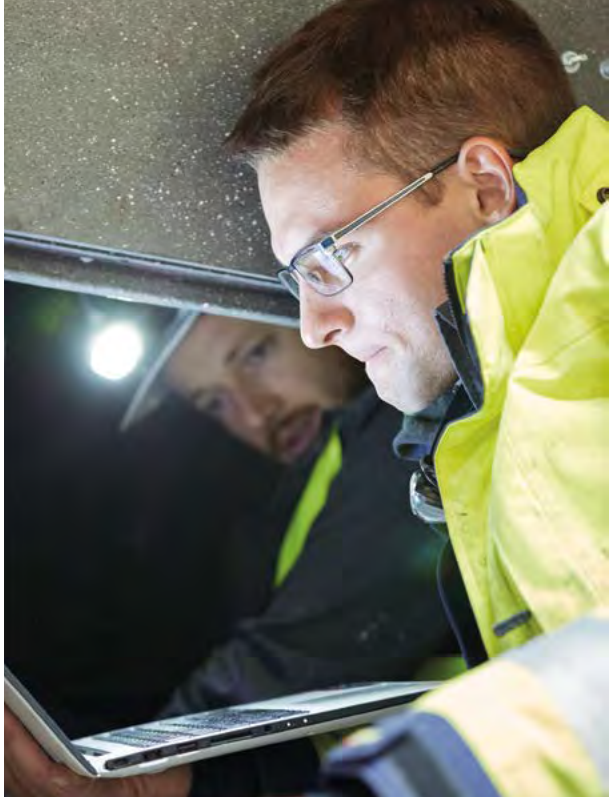
Damit dies gelingt und wir tatsächlich »gläserne« Windenergieanlagen betreiben, haben sich die Ingenieure des Wind-Teams am ZSW im wahrsten Sinne des Wortes in die Technik hineinvertieft: Sie haben einzelne Komponenten der Anlagen eigenhändig zusammengeschraubt, geprüft und in die Anlagen eingebaut und sind auf diese Weise mit jedem Detail der Anlagen – buchstäblich bis zur letzten Schraube – bestens vertraut. Damit haben wir optimale Bedingungen am Testfeld geschaffen und das nicht nur für die technische Forschung und Entwicklung. Wir widmen uns auch einer intensiven Naturschutzbegleitforschung, um uns einer Lösung des Konflikts zwischen der Windenergienutzung und dem Artenschutz zu nähern. Erstmals überhaupt erhalten Artenschutzexperten auf dem Testfeld die Gelegenheit, im Zuge ihrer Forschungsarbeiten in das Betriebsregime von Windenergieanlagen einzugreifen. Um das Verhalten von Vögeln oder Fledermäusen an Windenergieanlagen besser untersuchen zu können, können sie in bestimmten Zeitfenstern festlegen, wann die Anlagen stehen und wann sie laufen sollen und gegebenenfalls auch mit welcher Geschwindigkeit sich die Rotoren drehen.

The role of the ZSW far exceeds that of test site planner and operator, however, because it is also the manufacturer of the two wind turbines. We are in possession of all the design data and have access to every detail, meaning that alterations, component replacements or modifications to the operating mode are possible at any time without authorisation from an external manufacturer. This is another unique point of differentiation from other test sites, allowing innovative ideas conceived in research and industry to proceed directly to practical application and testing. The test site therefore also serves as a catalyst for innovation.

In order to ensure that this undertaking is successful and that the wind turbines we operate are entirely »transparent«, the engineers in the Wind team at the ZSW drilled down into the technicalities in the truest sense of the word, in that they themselves bolted individual turbine components together before testing and installing them in the turbines, rendering them fully conversant with every detail of the system – literally down to the last screw.
In this way we have managed to achieve optimum conditions at the test site – with more than technical research and development in mind. We are also devoting ourselves to intensive accompanying nature conservation research in order to find a solution to the conflict between wind energy use and species protection. It is the first time ever that wildlife conservation experts are being given the opportunity to intervene in the operating regime of wind turbines as part of their research work on the test site. They are allowed certain time slots to dictate when the turbines should stop and when they should run and, where applicable, the speed at which the blades should rotate in order to facilitate their research into the behaviour of birds or bats near wind turbines.

Überarbeitete und mit Sensoren ausgerüstete Rotorblätter.

Refurbished rotor blades equipped with sensors.



// ÜBER HINDERNISSE ZUM TESTFELD

Rückblickend war der Weg zum Testfeld sehr viel schwieriger und länger als erwartet. Bereits im Jahr 2017 wurde das Genehmigungsverfahren angestoßen. Es war jedoch aufgrund der starken Verbreitung des Rotmilans und anderer windenergiesensibler Arten am Standort trotz des Forschungscharakters des Testfelds sehr anspruchsvoll, alle artenschutzrechtlichen Anforderungen zu erfüllen, was uns letztlich mit einem aufwändigen Vermeidungs- und Risikomanagementkonzept gelungen ist. Wir haben diese Herausforderung gerne angenommen, weil gerade die starke Verbreitung des Rotmilans sowie relevanter Fledermausarten optimale Bedingungen für eine erfolgreiche Naturschutzforschung gewährleistet und herausragende Ergebnisse von internationaler Relevanz verspricht.
Doch nicht alle Naturschützer sahen die Chancen, die mit Forschungsvorhaben auf dem Testfeld für den Artenschutz verbunden sind. Eine kleine, der Windenergienutzung generell kritisch gegenüberstehende Naturschutzorganisation erhob zunächst Widerspruch gegen die im Juni 2020 erteilte Genehmigung des Testfelds und reichte nach dessen Abweisung Klage beim Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg ein. So dauerte es allein fast zweieinhalb Jahre, bis die Genehmigung nach der mündlichen Verhandlung und dem Urteilsspruch der Verwaltungsrichter im Oktober 2022 rechtskräftig bestätigt wurde. Weitere Verzögerungen ergaben sich während dieser Zeit nicht zuletzt auch durch Lieferengpässe und Kostensteigerungen aufgrund der globalen Coronakrise sowie des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine. Unsere Überzeugung vom Erfolg des Testfeldes ließ uns all dies zwar als Herausforderungen jedoch nicht als unüberwindbare Hindernisse begreifen. Und so konnten wir das Testfeld im März 2023 vollständig errichten und im September in Anwesenheit von Ministerpräsident Winfried Kretschmann, Umweltministerin Thekla Walker und der Ministerin für Landesentwicklung, Nicole Razavi, sowie weiteren Gästen aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und mit Bürgern vor Ort einweihen.

// OBSTACLES ON THE WAY TO THE TEST SITE

Looking back, the journey to the test site was much more difficult and longer than expected. The planning permission process was started in 2017. It was very challenging, however, to meet all the requirements under wildlife conservation law due to the high prevalence of the red kite and other species in the locality vulnerable to wind energy systems, despite the research remit of the test site, but we ultimately succeeded in doing so by introducing an elaborate avoidance and risk management system. We were keen to accept this challenge because it is the widespread incidence of the red kite and of pertinent bat species which is key when it comes to guaranteeing optimum conditions for successful nature conservation research and ensuring excellent results of international relevance.
But not all conservationists saw the opportunities associated with research projects for wildlife protection on the test site. A small nature conservation organisation which is generally critical of the use of wind energy initially entered an objection to the test site approval granted in June 2020 and, after its rejection, filed a lawsuit with the Baden-Württemberg Administrative Court. So it took almost two and a half years just for the permission to be declared legally binding after the oral hearing and the verdict of the administrative law judge in October 2022. Further delays occurred during this time, not least due to bottlenecks in the supply chains and cost increases owing to the global coronavirus crisis and the Russian war of aggression against Ukraine. We were so convinced of the value of the test site that we regarded all of these factors as challenges but not as insurmountable obstacles. And we were indeed able to complete the test site in March 2023 and inaugurate it in September with Minister-President Winfried Kretschmann, Environment Minister Thekla Walker and the Minister for Regional Development, Nicole Razavi in attendance along with other politicians, business leaders, academics and local citizens.

// AUF DEM WEG ZUR SPITZENFORSCHUNG

Mit dem Testfeld WINSENT können wir uns nun intensiv den vielfältigen Fragestellungen widmen, die mit der breiten Windenergienutzung im bergig-komplexen Gelände verbunden sind. Im Fokus stehen dabei technologische Forschungsfragen: Wie können die Effizienz, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Windenergieanlagen auch bei komplex strömenden Winden optimiert werden? Welche Möglichkeiten der Kostenoptimierung sind umsetzbar? Welche Werkstoffe haben das Potenzial, die Performance von Windenergieanlagen entscheidend zu verbessern?

Das Interesse der Windenergiebranche am Testfeld WINSENT – sowohl in der Forschung als auch bei Unternehmen – ist groß, stellt es doch eine Forschungs- und Innovationsplattform mit einzigartigen Möglichkeiten dar. Das Testfelddesign mit seinen zwei Forschungswindenergieanlagen, den vier Windmessmasten und der umfassenden messtechnischen Ausstattung bietet Untersuchungsmöglichkeiten, die es so für die Windenergieforschung bislang weltweit noch nicht gab, schon gar nicht in komplexen Topografien.

Eines der technischen Alleinstellungsmerkmale von WINSENT sind in tiefe Bohrungen eingelassene Messsensoren, die unterhalb der Fundamente der Windkraftanlagen im Karstgestein verankert wurden. Diese erfassen die mechanischen Kräfte und die Verkippung der Fundamente unter einwirkender Windlast und bilden zusammen mit den im Umfeld verteilten, ebenfalls in Bohrungen eingelassenen seismischen Sensoren ein bislang einzigartiges Messnetz.

WINSENT bietet nicht nur die Infrastruktur selbst als optimale Forschungsgrundlage, sondern zugleich eine umfassende Datenplattform, die von unseren Forschungspartnern genutzt und erweitert werden kann.

Zur Datenverfügbarkeit zählt auch eine umfassende Basis an historischen Messdaten am Standort. Denn bereits lange vor der Inbetriebnahme wurden seit 2018 am ersten und seit 2019 an zwei Messmasten hochaufgelöste meteorologische Daten aufgenommen, bevor der dritte und vierte Messmast hinzukamen. Dazu kommen mehrjährige Freifeldmessdaten wie die Wolkenhöhenmessungen des Ceilometers, Energieflussdaten der Eddy-Kovarianz-Stationen und laseroptische Lidar-Windströmungsmessungen.

// EN ROUTE TO CUTTING-EDGE RESEARCH

The WINSENT test site is now allowing us to devote much time and attention to the various issues associated with the widespread use of wind energy in complex mountainous terrain. The research focus is on questions about the technology, asking how the efficiency, reliability and service life of wind turbines can be optimised, even with complex wind flow patterns. Which options are viable in terms of minimising costs? Which materials have the potential to improve the performance of wind turbines to a significant extent?

There is great interest in the WINSENT test site in the wind energy industry – both in the research sector and in business enterprise – because it is perceived to be a research and innovation platform with unique opportunities. With its two research wind turbines, the four wind measurement masts and the extensive measurement equipment, the test site design offers scope for exploration on a scale never before encountered in wind energy research anywhere in the world, especially not in complex topographies.

WINSENT boasts some unique technical features, such as measuring sensors embedded in deep holes bored in the karst rock below the wind turbine foundations. These record the mechanical forces and the tilt angle of the foundations under the influence of wind load and, together with the seismic sensors scattered in the surrounding area and likewise embedded in boreholes, form a monitoring network without equal to date.

Not only does WINSENT offer the infrastructure itself as an optimum research base, but it doubles up as a comprehensive data platform that can be used and expanded by our research partners. There is also an extensive measurement data history at the site, adding to the availability of statistics, because high-resolution meteorological data had been recorded on the first measuring mast since 2018 and on two measuring masts since 2019, long before the site was put into operation and before the third and fourth measuring masts were added. Other information gathered over several years includes free-field data, such as cloud height measurements taken by the ceilometer, energy flow readings from the eddy covariance stations, and laser optic lidar wind flow measurements.

Seite links:
Installation faseroptischer Sensoren.

Page on the left:
Installation of fibre optic sensors.

// AUCH NATURSCHUTZFRAGEN TEIL DER FORSCHUNG

Ähnlich gute Bedingungen finden Forschungsteams vor, die Naturschutzfragen im Fokus haben. Denn neben den meteorologischen Daten wurden an den Messmasten in den vergangenen Jahren über die gesamte Höhe die Fledermausaktivität sowie die Insektenabundanz gemessen, ebenso an mehreren Stellen in der Umgebung des Testfeldgeländes. Darüber hinaus hat ein speziell dafür ausgelegtes Radargerät seit dem Jahr 2019 sämtliche Vogelbewegungen über dem Testfeld registriert und über telemetrierte Rotmilane – ergänzt durch Messungen mit Laser Range Findern – konnten bereits mehrere Tausend Flugwege von Rotmilanen in der Umgebung des Testfelds aufgezeichnet werden.

Eine weitere Besonderheit von WINSENT besteht darin, dass die Naturschutzdaten sekundengenau mit den meteorologischen Daten verschnitten werden können. Die Untersuchung des Verhaltens von Vögeln, Fledermäusen und Insekten an Windenergieanlagen in Abhängigkeit von Wetterzuständen gehört deshalb zu den Schwerpunkten der ZSW-eigenen Naturschutzforschungen im Vorhaben »NatForWINSENT – Naturschutzforschung am Windenergietestfeld«. Das Projekt läuft in mehreren Phasen bereits seit dem Jahr 2018 und verfolgt das zentrale Ziel, wirksame Vermeidungsmaßnahmen zum besseren Schutz von Vögeln und Fledermäusen an Windenergieanlagen zu konzipieren und zu testen. Das ZSW hat hierfür renommierte Forschungspartner aus dem In- und Ausland gewinnen können. Das Bundesumweltministerium sowie das Bundesamt für Naturschutz haben diese Arbeiten, die für die Zukunftsperspektiven der Windenergie von großer Bedeutung sind, mit bislang gut drei Millionen Euro gefördert.

Die Lösung des Konflikts zwischen der Windenergienutzung und dem Artenschutz oder zumindest dessen signifikante Entschärfung ist ein wesentlicher Schlüssel für eine hohe Akzeptanz der Windenergie in der Bevölkerung. Im Bereich der Akzeptanzforschung widmen wir uns deshalb u. a. der Frage, wie Geräuschemissionen von Windenergieanlagen speziell bei ihrem Betrieb in komplexen Topografien wirksam reduziert werden können. Diese Forschungsfrage stand bereits in den Vorhaben »Inter-Wind – Interdisziplinäre Analyse und Minderungsansätze – Anwohnererleben akustischer und seismischer WEA-Emissionen« und »FLAMINGO – Ganzheitlich optimierte individuelle Blattwinkelverstellung im Feld- und Modellversuch« im Zentrum, die das ZSW als Verbundpartner begleitet hat.

// NATURE CONSERVATION ISSUES NOT EXCLUDED FROM THE RESEARCH

Conditions on the ground compare favourably for research teams with a focus on nature conservation issues because, in addition to the meteorological data, the masts have been measuring bat activity and insect abundance over the entire height in recent years and at several locations in the vicinity of the test site. A specially designed radar device has also been in use since 2019, registering all bird movements over the test site. It has also already been possible to use telemetry – supplemented by measurements with laser range finders – to track and record several thousand flight paths of red kites in the area around the test site.

Another advantage of WINSENT is that the nature conservation data, for example, can be combined with the meteorological data to the second. The investigation of the behaviour of birds, bats and insects at wind turbines in relation to weather conditions is therefore one of the focal points of the nature conservation research conducted by the ZSW in the project »NatForWINSENT – Nature Conservation Research at the Wind Energy Test Site«. The project has been running since 2018 and there have been several phases with the central goal of designing and testing effective prevention measures for better protection of birds and bats near wind turbines. The ZSW has been able to attract eminent research partners at home and abroad for this work. The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV) and the Federal Agency for Nature Conservation (BfN) have so far invested a good three million euro in this research work which is of great importance for the future prospects of wind energy.

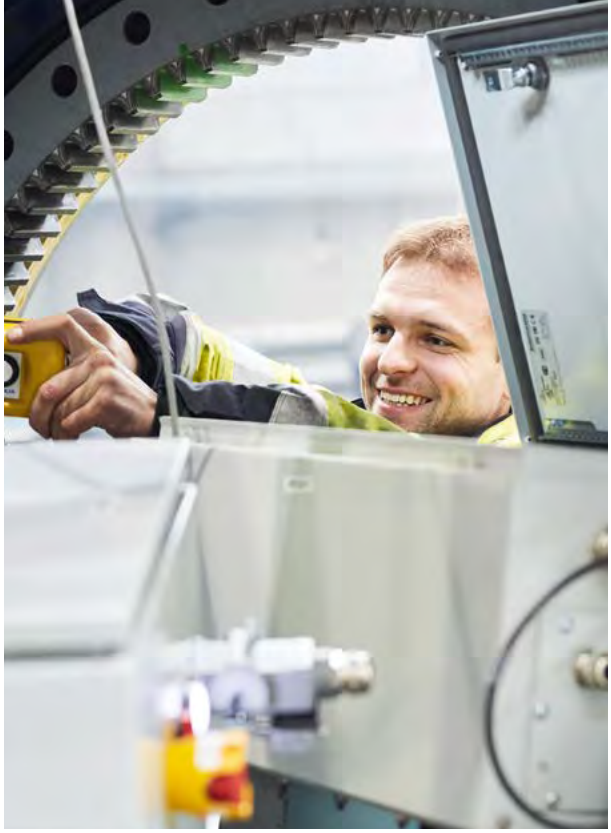
Resolving the conflict between wind energy and wildlife protection, or at least defusing it significantly, is an essential key to reaching a high level of public acceptance for the use of wind energy. One of the questions we ask when assessing acceptance is therefore how noise emissions from wind turbines can be effectively reduced, especially when operating in complex topographies. This issue has already been at the forefront of two joint research projects involving the ZSW, namely »Inter-Wind« which is concerned with interdisciplinary analysis and mitigation concepts, with a focus on acoustic and seismic wind turbine emissions experienced by residents, and »FLAMINGO« which is about the holistic optimisation and customisation of blade angles in field trials and model experiments.

// DAS ZSW VOR ORT

Bei den genannten Projekten fiel ein weiteres Alleinstellungsmerkmal des ZSW als Testfeldbetreiber ins Gewicht: unsere besondere Vernetzung in der Region. Denn als Planer waren wir stets selbst vor Ort aktiv. Wir haben die Kontakte zu den örtlichen Behörden und zur Kommunalpolitik geknüpft und unser Testfeld ebenso wie unsere Forschungsaktivitäten und die Intention, eine Entwicklungsplattform nicht nur für die Forschung, sondern insbesondere auch für die regionale Wirtschaft bereitzustellen, in Gemeindeparlamenten und Ortsräten vorgestellt. Auch gegenüber den regionalen Naturschutzverbänden haben wir nicht nur frühzeitig großen Wert auf Transparenz hinsichtlich unserer Forschungsziele gelegt, sondern auch Anregungen für die optimale Ausgestaltung der Naturschutzforschung direkt in unsere Planungen aufgenommen. Und nicht zuletzt arbeiten wir seit Jahren eng mit den ortsansässigen Landwirten zusammen, auf deren landwirtschaftlich genutzten Flächen wir das Testfeld errichtet haben, gleichzeitig aber auch Ausgleichs- und Vermeidungsmaßnahmen zum Schutz von Vögeln umsetzen. Die Menschen vor Ort kennen das ZSW und verbinden es mit Gesichtern, es bestehen persönliche Kontakte und vertrauensvolle Gesprächsfäden auf vielen Ebenen. Dies ist bei solchen Projekten durchaus keine Selbstverständlichkeit. Uns aber sichert es die Akzeptanz für unser Testfeld und die Möglichkeit, für neue Projektideen stets mit den Menschen ins Gespräch zu kommen, die wir vor Ort nicht nur mitnehmen, sondern auch begeistern wollen.

// THE ZSW AT LOCAL LEVEL

Another unique feature offered by the ZSW as a test site operator which carried weight in the projects mentioned was our special network in the region because, given our planning and design skills, we had always played an active part in our locality. We have established contacts with the local authorities and with regional policymakers and we have networked with local government and district councils, presenting our test site and our research work as well as the intention of providing a development platform not only for research, but especially for the regional economy. We also insisted on being open with the regional nature conservation associations about our research objectives early on, not only attaching great importance to transparency but also picking up on suggestions as to how to best incorporate nature conservation research into our planning. And, last but not least, we have been working closely with the local farmers for years, on whose agricultural land we set up the test site, while at the same time implementing compensation and avoidance measures to protect birds.
The local people know the ZSW and can put faces to the name, cultivating personal contacts, engaging in conversations and fostering trust on many levels. This is by no means a foregone conclusion in such projects. It is crucial for us, however, because it allows us to gain acceptance for our test site and gives us the opportunity to talk to the residents about new project ideas, given that we not only want them to be on board with our plans but also enthusiastic about our aims.



Sensoren und Schaltschränke werden in einer der Naben angebracht.

Sensors and control cabinets are installed in one of the hubs.

Aufsetzen des untersten Turmsegments auf das Fundament.

Placing the lowest tower segment on the foundation.

// VERNETZTE WISSENSCHAFT

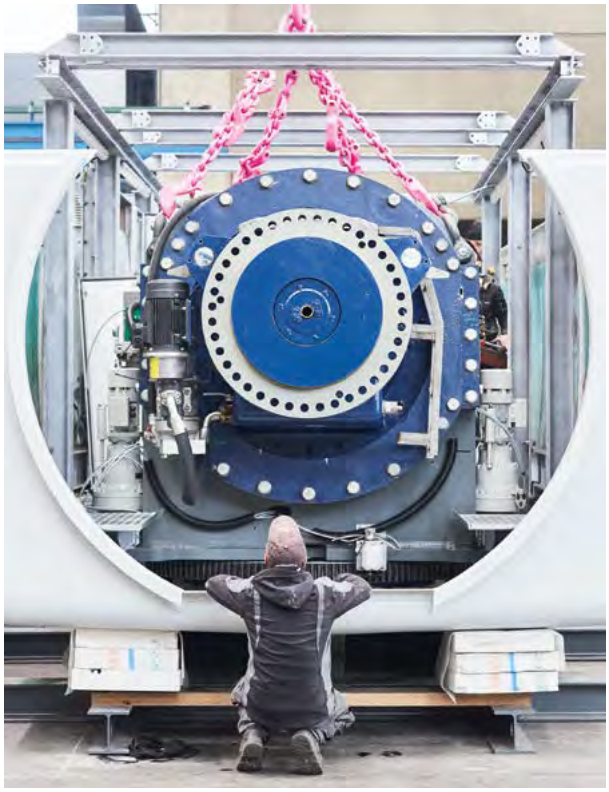
Für uns als ZSW ist die Vernetzung innerhalb der Wissenschaft ein wichtiger Teil unserer Arbeit und auch das Testfeld WINSENT ist aus einer solchen Vernetzung heraus entstanden. Zukünftig soll das Testfeld als Forschungsplattform aber nicht nur den von Beginn an beteiligten WindForS-Partnern, sondern vielen weiteren nationalen und internationalen Forscherteams aus Wissenschaft und Industrie ganz neue Möglichkeiten zur Umsetzung anwendungsorientierter Forschungs- und Entwicklungsprojekte eröffnen. Die Kooperation mit den WindForS-Partnern ist in den ersten Betriebsjahren des Testfelds schon dadurch gegeben, dass in das Vorhaben »WINSENTvalid«, mit dem WINSENT vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme ab in einen zuverlässigen Forschungsdauerbetrieb überführt wird, dieselben universitären Forschungspartner eingebunden sind, die bereits die Entstehungsphase des Testfelds und dessen Ausgestaltung begleitet haben. In Rahmen des Projekts »WINSENTvalid« werden die Partner unter anderem ihre numerischen Windenergieanlagenmodelle an die tatsächlich zum Einsatz gekommenen Anlagenkomponenten anpassen und mithilfe erhobener Messdaten validieren. Diese Arbeiten und die weitere intensive Kooperation sind perspektivisch für den Erfolg des Testfelds entscheidend, denn mit den validierten Modellen entstehen digitale Zwillinge, die es erlauben, die an unseren – vergleichsweise kleinen – Anlagen gewonnenen Erkenntnisse auf kommerzielle, moderne Großanlagen unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitstheorien zu skalieren und zu übertragen.

Unsere Vernetzung innerhalb der Wissenschaft geht jedoch schon zu diesem frühen Zeitpunkt weit über das Cluster WindForS hinaus. So besteht seit langem ein Austausch mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das mit »WiValdi« ebenfalls ein Forschungstestfeld betreibt, allerdings in flachen Geländestrukturen nordwestlich von Hamburg. Eingebunden sind wir auch in Wind Tasks der Internationalen Energieagentur IEA, wo das Testfeld und unsere Arbeiten auf großes Interesse in der internationalen Forschungscommunity, beispielsweise im Hinblick auf Aerodynamik (Task 47) und Hybride Kraftwerke (Task 50) stoßen.
Auch im Rahmen der Naturschutzforschung sind wir sehr gut an andere Akteure in diesem Bereich angebunden. So wird das Vorhaben NatForWINSENT schon seit Beginn von zwei spezifischen Expertenkreisen für Vögel und Fledermäuse begleitet, für die wir einschlägige Fachleute aus den jeweiligen Forschungsbereichen gewinnen konnten. Zudem sind wir als Teil des Forschungsschwerpunkts »Naturschutz und Erneuerbare Energien« des Bundesamts für Naturschutz im stetigen Austausch mit anderen, ähnlich gelagerten Forschungsprojekten. Nicht zu vergessen ist, dass wir als Forschungspartner für diesen Bereich renommierte Partner gewonnen haben, die auch ihrerseits wiederum bestens in der Fach- und Forschungsszene vernetzt sind. Hervorzuheben sind die Schweizerische Vogelwarte als Partner für die Vogelforschung und das Freiburger Institut für angewandte Tierökologie FrInaT für die Fledermausforschung.

// RESEARCH SCIENCE NETWORK

Networking within the research science community is an important part of our work here at the ZSW, and the WINSENT test site also came about as a result of such links. The future aim for the test site as a research platform is to open up completely new opportunities for the implementation of applied research and development projects, not only for the WindForS partners who have been involved from the start, but also for many other national and international research teams from science and industry. The cooperation with the WindForS partners in the first years of operation of the test site is set to continue, given that the same university research partners who have accompanied the development phase of the test site and its design are involved in the »WINSENTvalid« project, which will see WINSENT through from initial launch to a solid phase of long-term research operation. As part of their remit in the »WINSENTvalid« project, the partners will adapt their numerical wind turbine models to the system components actually used and validate them with reference to the data collected in measurements. This work and the continued intensive cooperation are crucial to the future success of the test site because the validated models will provide digital twins which will allow the knowledge gained from our – comparatively small – systems to be scaled up and transferred to large modern, commercial systems, taking similarity theories into account.

Even at this early stage, however, our network within the scientific community extends far beyond the WindForS cluster. Links have long existed with the German Aerospace Center (DLR), for example, which also operates a research test site called »WiValdi«, although this is in flat terrain north-west of Hamburg. We are also involved in the work in Wind Tasks, as listed by the International Energy Agency (IEA), where the test site and our work generate great interest in the international research community in such fields as aerodynamics (Task 47) and hybrid power plants (Task 50), for example.
Nature conservation research is another domain in which we are very well connected to other key players in the field. The NatForWINSENT project has been accompanied since the outset by two groups with specific expertise in birds and bats, for example, for which we were able to recruit specialists from the respective fields of research. Given the focus of the Federal Agency for Nature Conservation on »Nature Conservation and Renewable Energy« and our involvement in this research, we also keep abreast of the work in other research projects with a similar remit. It is important to bear in mind that our partnership status has brought us into contact with respected experts who are, in turn, also well connected in the relevant specialist and research networks. Partners of note include the Swiss Ornithological Institute, for bird research, and the Freiburg Institute of Applied Animal Ecology (FrInaT), for bat research.



^^
Biegeversuch und Sensorvalidierung während eines Rotorblatttests.

^^
Bending test and sensor validation during a rotor blade test.

^
Einsetzen des Maschinenträgers samt Getriebe in die Gondelverkleidung.

^
Inserting the machine support including gearbox into the nacelle housing.

// VON DER FORSCHUNG IN DIE PRAXIS

Ein besonderer Fokus von WINSENT liegt darüber hinaus auf seiner Funktion als Forschungs- und Innovationsplattform für die deutsche und internationale Windenergieindustrie. Erfolgreiche Entwicklungen unmittelbar in die industrielle Anwendung zu überführen, gehört seit jeher zu den Kernanliegen des ZSW und die Entwicklung des Testfelds wurde von Beginn an von namhaften Industrieunternehmen begrüßt und unterstützt.
In der im November 2023 veröffentlichten »Strategic Research & Innovation Agenda 2025-2027« [1] der ETIPWind (European Technology and Innovation Platform on Wind energy) adressierten die Teilnehmer von namhaften europäischen Unternehmen und Forschungsinstituten zahlreiche Forschungsthemen, für die sich WINSENT herausragend als Technologieträger und Innovationsbeschleuniger eignet. So können wir hier beispielsweise neue, innovative Health-Monitoring-Systeme für struktur- und funktionsrelevante Komponenten im Feldtest erproben. Neu entwickelte Substitute für schwer recycelbare oder kritische Rohstoffe in Schlüsselkomponenten (z. B. Rotorblätter, Generatoren sowie Elektro- und Netzkomponenten) können hier ebenfalls ihre Praxistauglichkeit unter Beweis stellen.
Unser Know-How zum Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz ebnet zudem den Weg für weitreichende Innovationen bei der Entwicklung neuer KI-Tools für die Überwachung von Anlagen, prädiktive Wartung sowie Verlängerung der Lebensdauer von Komponenten, insbesondere von Getrieben, elektronischen Bauteilen und Generatoren.
Ein bereits umgesetztes Beispiel für neue produktorientierte Entwicklungen ist ein Antikollisionssystem für Greifvögel: Parallel zur Errichtung des Testfelds WINSENT hat das ZSW mit dem »BirdRecorder« ein KI-gestütztes System entwickelt, das über Kameras Greifvögel wie den Rotmilan artgenau bis auf eine Entfernung von 700 Metern erkennen und so durch ein rechtzeitiges Abschaltsignal an die Windenergieanlagen vor Kollisionen schützen kann. Nach erfolgreichen Tests unter Realbedingungen ist für das Frühjahr 2024 die Validierung nach einem von der Schweizerischen Vogelwarte entwickelten Standard vorgesehen, so dass dem Markt zeitnah ein zuverlässiges und kostengünstiges System zur Verfügung gestellt werden kann. Für die Software-Entwicklung zur KI-gestützten Vogelarterkennung wurde das ZSW-Team im Jahr 2023 durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg zum KI-Champion gekürt.

1. https://etipwind.eu/files/file/agendas/231205-ETIPWind-SRIA.pdf

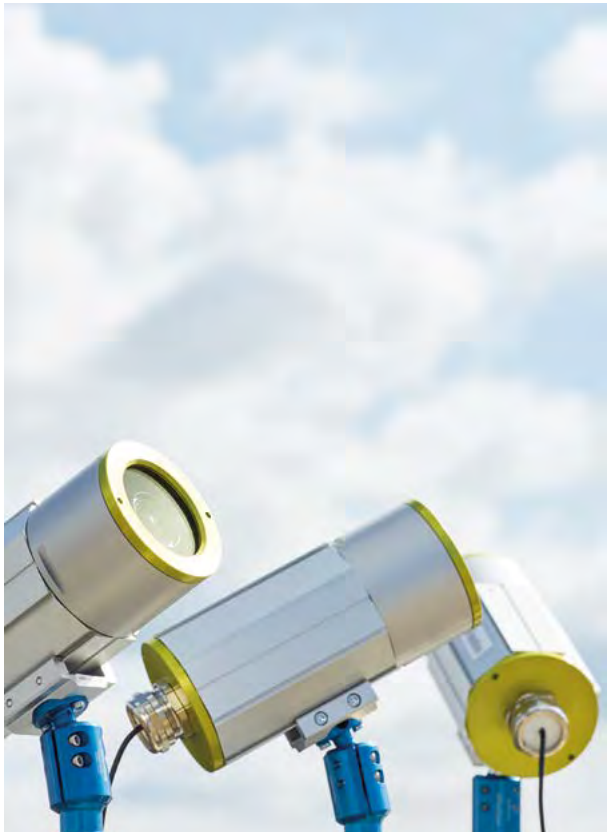
// FROM THEORY TO PRACTICE

WINSENT has another special focus, given its role as a platform for research and innovation for the German and international wind energy industry. The direct transfer of successful developments to industrial application has always been one of the core concerns of the ZSW, and the development of the test site was welcomed and supported from the start by big names in enterprise and industry.
In the »Strategic Research & Innovation Agenda 2025-2027«[1], published by the European Technology & Innovation Platform on Wind Energy (ETIPWind) in November 2023, the stakeholders from prime European companies and research institutes addressed numerous research subjects in which WINSENT is ideally placed to take the lead in technology and accelerate innovation. We can conduct field tests, for example, on new and innovative health monitoring systems for components relevant to design and function. Newly developed substitutes for difficult-to-recycle or critical raw materials in key components (e.g. rotor blades, generators, electrical components and network components) can also prove their suitability in practice here.
Our know-how in the adoption of artificial intelligence methods is also paving the way for far-reaching innovations in the development of new AI tools for the monitoring of systems, predictive maintenance, and the extension of the service life of components, especially gearboxes, electronic components and generators.
One example of new product-driven developments already rolled out is an anti-collision system for birds of prey. While constructing the WINSENT test site, the ZSW developed the »BirdRecorder«, an AI-assisted system which uses cameras to detect and identify birds of prey, such as the red kite, from as far away as 700 metres and then send a signal to shut down the wind turbines in time to avert danger and prevent collisions. Following successful tests in real conditions, a validation process is planned for spring 2024 with reference to a standard developed by the Swiss Ornithological Institute, preparing the ground for a reliable and cost-effective system to be brought to market in due time. The ZSW team was crowned AI Champion in 2023 by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs for its development of software for AI-powered bird species recognition.

1. https://etipwind.eu/files/file/agendas/231205-ETIPWind-SRIA.pdf

// WINSENT ALS QUERSCHNITTSPLATTFORM FÜR DAS ZSW

Ein weiteres, für die nachhaltige Nutzung der Windenergie sehr wichtiges Thema, ist das Recycling von Altanlagen. Während für Stahltürme, Kabel oder Maschinenteile Verwertungsketten bereits etabliert sind, ist dies für die Rotorblätter, die überwiegend aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) gefertigt werden, nicht der Fall. Es besteht zwar die Möglichkeit, diese zu zerkleinern und Baustoffen wie Zement beizumischen, einer sinnvollen Verwertung im Sinne einer Kreislaufführung entspricht das jedoch nicht. Deshalb arbeiten die ZSW-Expertinnen und -Experten im Bereich Circular Economy aus dem Fachgebiet REG intensiv an der Entwicklung von Pyrolyse-Verfahren, um über chemisches Recycling aus alten Rotorblättern Wasserstoff und Kohlenstoff als Grundbausteine für neue Werkstoffe – u. a. für Rotorblätter – zurückzugewinnen.
Das Testfeld WINSENT ist neben der Material- und Komponentenebene auch prädestiniert dafür, auf der technischen Systemebene innovative Konzepte z. B. für Kombi-Kraftwerke bzw. die Verknüpfung verschiedener Stromerzeugungs- und Speichertechnologien zu entwickeln und zu testen. Für die entsprechende Systemtechnik können wir auf die umfassende Erfahrung im Fachgebiet MSA zurückgreifen. Die einzelnen, für den Einsatz denkbaren Komponenten spiegeln die gesamte Kompetenz des ZSW wider – von der Photovoltaik über Batterien bis hin zur Wasserstofferzeugung und der Brennstoffzellentechnologie.
Es wird hieran deutlich: Mit dem Windenergie-Forschungstestfeld haben wir ein neues Kapitel für die Entwicklung des ZSW aufgeschlagen. Unsere Spitzenforschung im Bereich der erneuerbaren Energien an der Schwelle zur Anwendung wird mit WINSENT um einen neuen Leuchtturm erweitert – 100 Meter hoch und weithin sichtbar.



// WINSENT AS AN INTERDISCIPLINARY PLATFORM FOR THE ZSW

Another issue of great importance for the sustainable use of wind energy is the recycling of old systems. Reclamation chains have already been established for steel towers, cables and machine parts, but the same cannot be said for rotor blades which are predominantly made of glass-fibre reinforced plastic (GRP). It may be possible to shred them and add them to building materials like cement but this does not constitute a proper closed-loop recycling system. This is why the ZSW circular economy experts from the REG department are working hard on the development of pyrolysis processes in a bid to recover hydrogen and carbon from old rotor blades by means of chemical recycling so that they can serve as basic building blocks for new materials, including rotor blades.
In addition to its usefulness at material and component level, the WINSENT test site is also suitable for the development and testing of innovative concepts at technical system level, e.g. for combined cycle power plants or the linkage of different electricity generation and storage technologies. We can draw on our extensive experience in the MSA department for the relevant knowledge of systems engineering. The individual components which come to mind as being suitable for use reflect the full breadth of expertise at the ZSW – from photovoltaics and batteries right through to hydrogen production and fuel cell technology.
It is evident that the wind energy research test site marks the start of a new chapter in the development of the ZSW. Our cutting-edge research in the field of renewable sources of energy on the brink of application is being expanded with WINSENT to include a new lighthouse – 100 metres high and visible from afar.

FACHGEBIETE &
FORSCHUNGSPROJEKTE

DEPARTMENTS & RESEARCH PROJECTS

// Systemanalyse (SYS)
// Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Den Transformationsprozess des Energie- und Wirtschaftssystems zur Klimaneutralität auf allen Ebenen aktiv zu gestalten, ist zentrale Aufgabe des Fachgebiets SYS.
Das Team »Windenergie« setzt direkt bei der Technologie an. Im Fokus stehen die Entwicklung und Erprobung technischer Lösungen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Windenergienutzung in bergigem Gelände, z. B. durch neue, verschleißärmere Materialien. Gleichzeitig geht es um eine Steigerung der Akzeptanz u. a. durch die Reduktion von Lärmemissionen, flankiert durch die naturschutzfachliche Begleitforschung, mit deren Ergebnissen der Konflikt zwischen Windenergienutzung und Artenschutz gelöst werden soll.
Daten sind der Ausgangspunkt für das Team »Simulation und Optimierung«. Mit Verfahren des Maschinellen Lernens werden in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen durch Prozessoptimierungen Energie- und Ressourcenbedarfe gezielt reduziert oder neue Produkte wie ein technisches System zur Erkennung windenergie-gefährdeter Vogelarten entwickelt. Mit diesen Kompetenzen wird das Technologie-Know-How anderer Fachgebiete des ZSW hervorragend ergänzt.
Die strategische Systemanalyse arbeitet an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft und bewertet parallel zur Technologieentwicklung Marktchancen, lotet internationale Wettbewerbspositionen aus und analysiert Wertschöpfungspotenziale. An der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik werden neue Markteinführungsinstrumente für grünen Wasserstoff, grünen Kohlenstoff, synthetische Kraftstoffe etc. entwickelt.

// Our core areas of expertise

The main brief of the SYS department is to play an active role in shaping the transformational processes for a climate-neutral economy and energy system at all levels.
The »Wind Energy« team is directly concerned with the technology. The focus is on the development and testing of technical solutions with a view to increasing the efficiency of wind energy use in mountainous terrain, e.g. through new materials less susceptible to wear and tear. At the same time, they are thinking of ways to increase acceptance, such as through the reduction of noise emissions, accompanied by research into nature conservation, intending thereby to resolve the conflict between the use of wind energy and wildlife protection.
Data are the starting point for the »Simulation and Optimisation« team. Machine learning methods are used to reduce energy consumption and resource requirements through the optimisation of processes in a wide variety of applications or to develop new products, such as a technical system for the detection of bird species endangered by wind energy. These areas of expertise dovetail beautifully with the technological know-how in other departments at the ZSW.
Strategic systems analysis works at the interface between science and business and parallel to technology development, evaluating market opportunities, sounding out the position of international competitors and analysing potential for added value. New market launch instruments for green hydrogen, green carbon and synthetic fuels, etc. are being developed at the interface between science and politics.

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

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

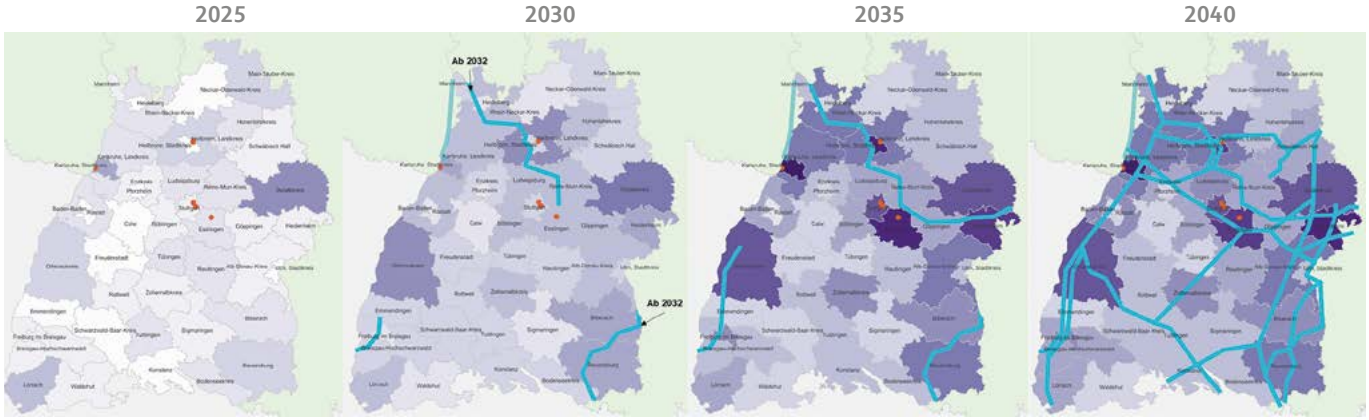
»Green hydrogen has the potential to be a ›game changer‹ – it opens up the possibility of guiding industrialised societies to climate neutrality without any devaluation and, at the same time, it offers potential for sustainable added value and future prospects for developing countries.«

// H_2-Bedarfsanalyse für Baden-Württemberg

Im Rahmen des »Fachdialogs Wasserstoff-Infrastruktur« wurde Wasserstoff als Rohstoff und Energieträger als unverzichtbar für die Branchen Chemie, Papier, Glas, Zement und Raffinerien ebenso wie in den Kraftwerken zur Stromerzeugung identifiziert. Weitere Einsatzbereiche wurden zunächst für die Prozesswärme in diversen Wirtschaftszweigen in mittelständischen Betrieben vermutet, eine Quantifizierung war jedoch nicht möglich. Weil für die Infrastrukturplanung jedoch belastbare Kenntnisse zum Bedarf unerlässlich sind, wurde parallel zum Fachdialog eine landesweite Wasserstoffbedarfsabfrage initiiert. Diese zielte auf Unternehmen des produzierenden Gewerbes, war aber für alle potenziellen H_2-Abnehmer offen.
474 Meldungen gingen ein, davon 277 aus der Industrie und 197 aus anderen Bereichen v. a. aus der kommunalen Energieversorgung. Verglichen mit vorhergehenden Studien zeigt die Umfrage, dass H_2 sehr viel früher und in sehr viel größeren Mengen benötigt wird: Der Bedarf wächst von 2,9 TWh im Jahr 2023, über 4,1 TWh in 2025 auf 22,7 TWh in 2030 und über 73,5 TWh in 2035 auf 90,7 TWh im Jahr 2040.
Die Analyse bestätigt, dass eine Vielzahl von Wirtschaftszweigen H_2 als Option für eine klimaneutrale Produktion nutzen möchte – teilweise deutlich vor 2030. Die regionale Verteilung der Bedarfe (siehe Abb.) unterstreicht dabei auch die Notwendigkeit der schnellen Entwicklung von lokalen Versorgungskonzepten.

// H_2 demand analysis for Baden-Württemberg

Hydrogen was identified as an indispensable raw material and energy source for the chemical, paper, glass and cement industries, for refineries and for power plants for the generation of electricity in the discussion forum for hydrogen infrastructure »Fachdialog Wasserstoffinfrastruktur«. Additional areas of application for process heat had initially been assumed in various sectors of the economy in small and medium-sized companies, but quantification had not been possible. A nationwide survey of the demand for hydrogen was conducted parallel to the discussion forum, however, because sound figures are essential for infrastructure planning. This was aimed at manufacturing companies but was open to all potential H_2 buyers.
474 replies were received, 277 of which were from industry and 197 from other areas, mainly from the municipal energy supply sector. The survey shows that H_2 will be needed much earlier and in much larger quantities than was the case in previous polls, with demand growing from 2.9 TWh in 2023 to 4.1 TWh in 2025 through to 22.7 TWh in 2030 before rising to 73.5 TWh in 2035 all the way to 90.7 TWh in 2040.
The analysis confirms that a large number of economic sectors would like to use H_2 as an option for climate-neutral production – in some cases well before 2030. The regional distribution of demand (see diagram) also underlines the need for the rapid development of local supply systems.



Wasserstoffbedarf (GWh)
Hydrogen demand (GWh)

- 0-25
- 25-50
- 50-100
- 100-250
- 250-500
- 500-750
- 750-1000
- 1000-2000
- 2000-4000
- 4000-6000
- 6000-8000
- >8000
- H_2-Pipeline
- Power-plants

Patrick Wolf
patrick.wolf@zsw-bw.de
+49 711 7870-344

// Unterstützung einer effizienten H_2-Infrastrukturplanung für Baden-Württemberg

Treibhausgasneutralität ist ohne grünen H_2 nicht zu erreichen. Das belegen sogenannte Net-Zero-Szenarien auf globaler, europäischer und Bundesebene mit Mindest-H_2-Bedarfen von bis zu 25 % des jeweiligen Endenergiebedarfs im Jahr 2050. Der Druck auf die Industrie, bereits zeitnah auf fossile Energieträger zu verzichten, ist zudem durch die Energiekrise infolge des russischen Angriffskriegs auf die Ukraine noch einmal massiv gestiegen. Hierdurch wird die Verfügbarkeit von grünem H_2 zu einem wichtigen Standortfaktor. Um als Industriestandort international attraktiv, vor allem aber wettbewerbsfähig zu bleiben, muss Baden-Württemberg für die hier ansässigen Unternehmen schnellstmöglich den Zugang zu grünem H_2 sichern. Dies kann nur über eine integrierte H_2-Infrastrukturplanung gelingen, die die vier Elemente Fernleitungsnetz, Verteilnetze, lokale H_2-Hubs und Vor-Ort-Eigenversorgung in optimaler Weise verbindet.

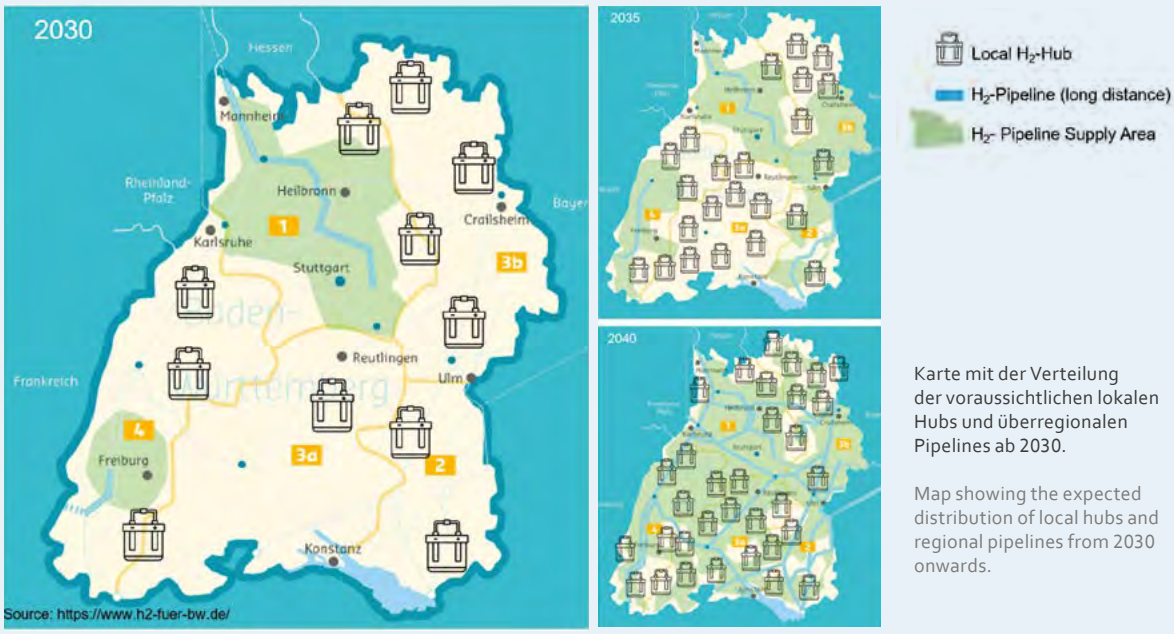
Über das Fernleitungsnetz wird H_2 in Baden-Württemberg nicht vor 2030 nennenswert verfügbar sein. Ein sich zeitnah dynamisch entwickelnder Bedarf der Industrie erfordert Vor-Ort-Erzeugung und lokale H_2-Hubs. Dass beide Elemente – lokale Hubs und überregionale Pipelines – das Grundgerüst für eine integrierte Gesamtinfrastruktur bilden, ist eines der Kernergebnisse des vom Fachgebiet SYS begleiteten »Fachdialogs Wasserstoffinfrastruktur«.

// Support for efficient H_2 infrastructure planning for Baden-Württemberg

Greenhouse gas neutrality cannot be achieved without green H_2. This is backed up by net zero scenarios at global, European and federal levels with minimum H_2 requirements of up to 25 % of the respective final energy demand in 2050. There has also been another huge increase in the pressure on industry to act quickly to abandon fossil fuels due to the energy crisis resulting from Russia's war of aggression on Ukraine.

This makes the availability of green H_2 an important location factor. Baden-Württemberg must ensure access to green H_2 for the companies based here as quickly as possible in order to remain internationally attractive and, above all, competitive as an industrial location. This can only be achieved through integrated H_2 infrastructure planning combining the long-distance pipeline network, distribution grids, local H_2 hubs and self-sufficiency at regional level to optimum effect.

There will not be an appreciable supply of H_2 through the long-distance pipeline network in Baden-Württemberg before 2030. Given the dynamic growth in requirements in industry, the needs will have to be met by regional production and local H_2 hubs. The fact that both elements – local hubs and regional pipelines – form the basic framework for an integrated overall infrastructure is one of the key results to emerge from the discussions on the »Fachdialog Wasserstoffinfrastruktur« hydrogen infrastructure forum followed by the SYS department.



Karte mit der Verteilung der voraussichtlichen lokalen Hubs und überregionalen Pipelines ab 2030.

Map showing the expected distribution of local hubs and regional pipelines from 2030 onwards.

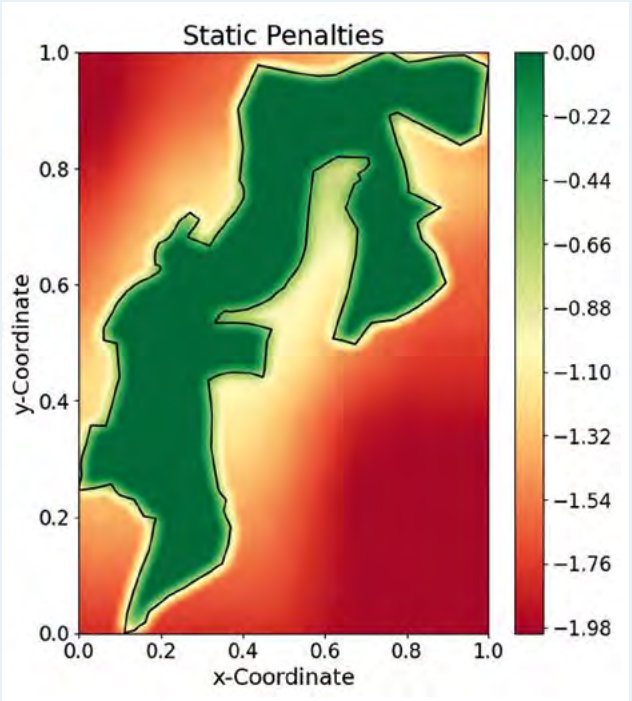
Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt
maike.schmidt@zsw-bw.de
+49 711 7870-232

// Optimierung von Windpark-Layouts mit KI

Windparks werden bislang nach relativ einfachen Gesichtspunkten entworfen und die Anlagen dabei so angeordnet, dass eine gegenseitige Abschattung des Windes möglichst vermieden wird. Diese Layouts sind insbesondere in komplexen Geländen in der Regel nicht optimal. Das Projekt Learn2Site des ZSW hat deshalb zum Ziel, eine Methode zu entwickeln, mit der optimale Parklayouts generiert werden können, indem nicht nur die produzierbare Strommenge eines Parks maximiert wird, sondern gleichzeitig auch die Lebensdauer der Anlagen bei einer Minimierung der notwendigen Wartungen. Dabei gilt es, das Gelände – z. B. mit Bewaldung und Hügeln – sowie Mindestabstände zu Straßen, Stromleitungen, bewohnten Gebieten und Artenschutzzonen mit zu berücksichtigen.
Learn2Site verwendet die Machine-Learning-Methode PGPE, um ein optimales Parklayout zu finden. In jedem Iterationsschritt wird eine Kostenfunktion berechnet, welche alle genannten Aspekte bewertet und einen Gütewert (Reward) liefert. PGPE lernt hierbei, verbotene Bereiche komplett zu vermeiden und den Reward durch optimale Konfiguration zu maximieren.
Aktuell entwerfen Studierende der Hochschule der Medien eine interaktive Web-App basierend auf dem bereits bestehenden Learn2Site, welche als Demonstrator des Prototypen fungieren wird. Außerdem wird die Performance des Codes von den Studierenden verbessert.

// AI optimisation of wind farm layouts

Wind farms have been designed according to relatively simple principles hitherto, with the turbines being positioned in such a way as to prevent them from sheltering each other from the wind. These layouts are generally not optimal, especially in complex terrain. The aim of the ZSW Learn2Site project is therefore to develop a method whereby farm layouts can be optimised by not only maximising the quantity of power produced by a farm but also the service life of the turbines in minimising the amount of maintenance required. It is necessary to take into account the terrain – e.g. including forests and hills – and minimum distances from roads, power lines, residential areas and wildlife protection zones.
Learn2Site uses the PGPE machine learning method to find an optimum farm layout. A cost function is calculated in each iteration step, duly evaluating all the aspects mentioned and providing a quality value (reward). PGPE learns to avoid prohibited areas completely and to maximise the reward through optimal configuration.
Students at the Media University are currently designing an interactive web app based on the existing Learn2Site which will act as a demonstrator of the prototype. The performance of the code is also being improved by the students.



Verteilung der Gütewerte innerhalb eines vorgegebenen Baugebiets (gesamte Fläche).

Distribution of quality values in respect of the specified building area (complete area).

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

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)
// Photovoltaics: Materials Research (MAT)

// Unsere Kernkompetenzen

Um den Ausbau der Photovoltaik (PV) zu beschleunigen, arbeitet das ZSW an Materialen und Fertigungsverfahren für die nächste Generation der PV. Der Fokus liegt dabei auf Lichtabsorbern aus metallorganischen Perowskiten und Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS). Diese Dünnschichttechnologien zeichnen sich durch einen geringen Material- und Energieeinsatz sowie kostengünstige Herstellverfahren aus. Weitere Vorteile sind ein geringer ökologischer Fußabdruck und die Möglichkeit, leichte und flexible Folien als Trägermaterial zu verwenden. Mit Tandem-Solarzellen, die zwei Absorber mit unterschiedlicher optischer Bandlücke kombinieren, lassen sich zudem Wirkungsgrade oberhalb des praktischen Wirkungsgrad-Limits konventioneller PV-Technologien erreichen.
Forschungsarbeiten zu neuen Materialien, Solarzellen und Herstellungsprozessen werden im Labor durchgeführt, bevor sie im Technikum auf größere Modulflächen übertragen werden. Dort können Module bis zu einer Größe von 30 × 30 cm² weitgehend mit Durchlaufprozessen und damit sehr industrienahen Verfahren entwickelt und hergestellt werden. Das ermöglicht den schnellen Transfer neuer Forschungsergebnisse und Prozesse in die industrielle Fertigung. Auf flexiblen Substraten wie Polymer- oder Metallfolien werden im Rolle-zu-Rolle-Verfahren Herstellungsverfahren für beliebig lange und bis zu 30 cm breite Dünnschichtmodule entwickelt. Diese können im Freifeld, auf dem Hausdach sowie als integrierte Photovoltaik in Fahrzeugen und Gebäudefassaden eingesetzt werden. Auf Basis seiner großen Erfahrung mit Dünnschichtsolarmodulen löst das Fachgebiet für Kunden vielfältige prozesstechnische und materialanalytische Aufgaben.

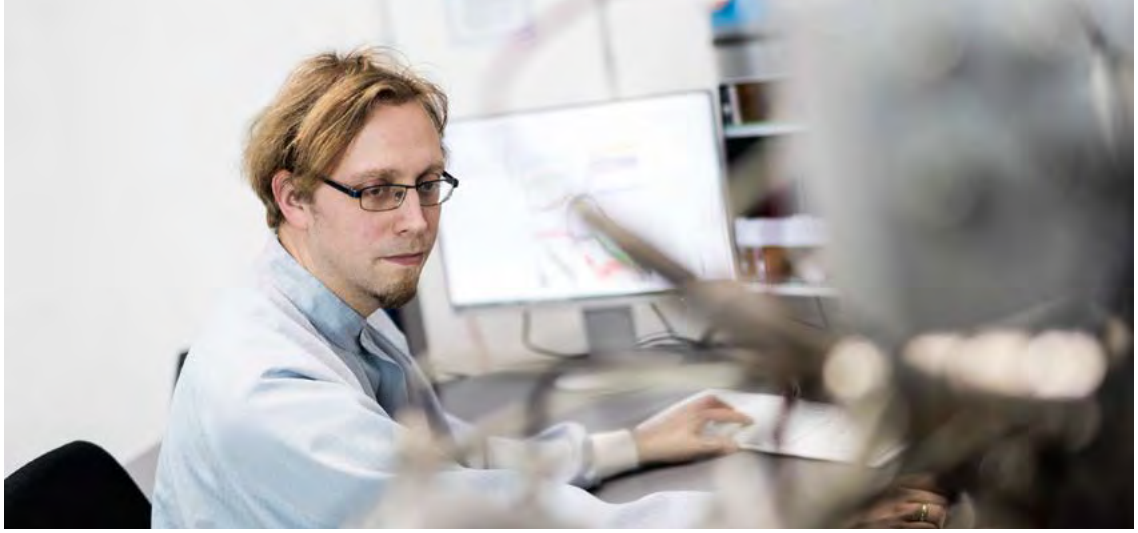
// Our core areas of expertise

The ZSW is working on materials and manufacturing processes for the next generation of photovoltaics (PV) in a bid to accelerate the expansion of PV. The focus is on light absorbers made of organometallic perovskites and copper indium gallium selenide (CIGS). The advantages of these thin-film technologies include low material input, low energy consumption and inexpensive manufacturing processes. They also boast a small carbon footprint as well as the possibility of using light and flexible films as carrier materials. It is also possible to achieve efficiency levels above the limit of conventional PV technologies in practice by using multi-junction solar cells which combine two absorbers with different optical band gaps.
Research work on new materials, solar cells and manufacturing processes is carried out in the laboratory before being transferred to larger cell surfaces in the pilot plant. It is then possible to develop and manufacture modules measuring up to 30 × 30 cm² mainly using continuous processes – and therefore very similar to industrial production lines. This enables the rapid transfer of new research findings and production processes to industry. Working on flexible substrates, such as polymer foil or metal foil, roll-to-roll processes are developed for thin-film modules up to 30 cm wide and of any length. These can be used outdoors, on rooftops and as integrated photovoltaics in vehicles and on buildings. Drawing on its extensive experience in thin-film solar modules, the department carries out a wide range of process engineering and material analysis jobs for customers.

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

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

»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.«

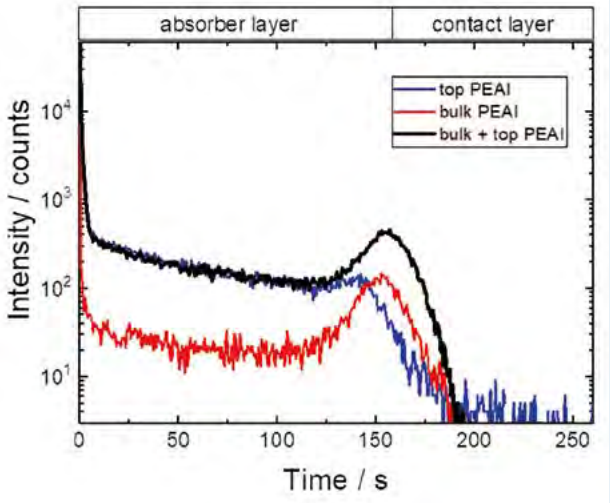


// Flugzeitmassenspektrometrie (TOF-SIMS) am ZSW – Optimierung der Ladungsträgerextraktion in Perowskitsolarzellen

Perowskitschichten lassen sich in guter Qualität mit einfachen Methoden herstellen. Für eine effiziente Nutzung der im Absorber erzeugten Ladungsträger müssen jedoch auch die Grenzflächen des Perowskits sowie die an den Perowskit angrenzenden Schichten optimiert sein. Durch Tiefenprofile mittels Flugzeitmassenspektrometrie (ToF-SIMS) konnte das ZSW nachweisen, dass Lösemittelreste in der flüssigprozessierten Elektronentransportschicht eine entscheidende Rolle hinsichtlich der nachfolgend abgeschiedenen Schichten und des Wirkungsgrads der kompletten Solarzellen spielen.
Des Weiteren ist die Passivierung von Defekten im und an der Oberfläche des Perowskits unabdingbar. Hierzu kann das Passivierungsmaterial Phenethylammoniumiodid (PEAI) in die Perowskitausgangslösung gemischt oder separat auf die Perowskitschicht abgeschieden werden. ToF-SIMS-Tiefenprofile (siehe Abb. unten) zeigen, dass sich bei der nachträglich abgeschiedenen Passivierung die Moleküle hauptsächlich an der Oberfläche, aber zum Teil auch im Volumen befinden. Dagegen sind bei der gemischten Lösung die Passivierungsmoleküle in der fertigen Schicht weitgehend ober- und unterhalb der Perowskitschicht lokalisiert.
Diese neuen Erkenntnisse führten durch optimierte Passivierung zu einer Steigerung der Wirkungsgrade um 2 % absolut.

// Time-of-flight mass spectrometry (ToF-SIMS) at the ZSW – Optimisation of charge carrier extraction in perovskite solar cells

Perovskite layers of a good quality can be produced using simple methods. For efficient use of the charge carriers generated in the absorber, however, it is also necessary to optimise the perovskite boundary surfaces and the layers adjacent to the perovskite. Using depth profiles enabled by time-of-flight mass spectrometry (ToF-SIMS), the ZSW was able to demonstrate that solvent residues in the liquid-processed electron transport layer play a key role in the layers subsequently deposited and in the efficiency of the complete solar cells.
The passivation of defects in and on the surface of the perovskite is also essential. Phenethylammonium iodide (PEAI) can be used as a passivation material for this purpose, either mixed into the initial perovskite solution or deposited separately on the perovskite layer. ToF-SIMS depth profiles (see diagram) show that the molecules are located mainly on the surface in the subsequently deposited passivation layer but in some cases in the volume (presumably at the grain boundaries). In the mixed solution, by contrast, most of the passivation molecules in the finished layer are located above and below the perovskite layer. These new findings led to a further improvement in the manufacturing processes and, through optimised passivation, to an absolute increase of 2 % in efficiency levels.



Beeinflussung der Verteilung des Passivierungsmoleküls im ToF-SIMS-Tiefenprofil im Absorber: Abscheidung auf dem Perowskit (blau), Mischung mit Perowskitlösung (rot), Kombination beider Methoden (schwarz).

Influencing the distribution of the passivation molecule in the ToF-SIMS depth profile in the absorber: deposition on the perovskite (blue), mixing with perovskite solution (red), combination of both methods (black).

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

// Dünnschicht-Tandemsolarzellen aus Perowskit und CIGS mit über 27 % Wirkungsgrad

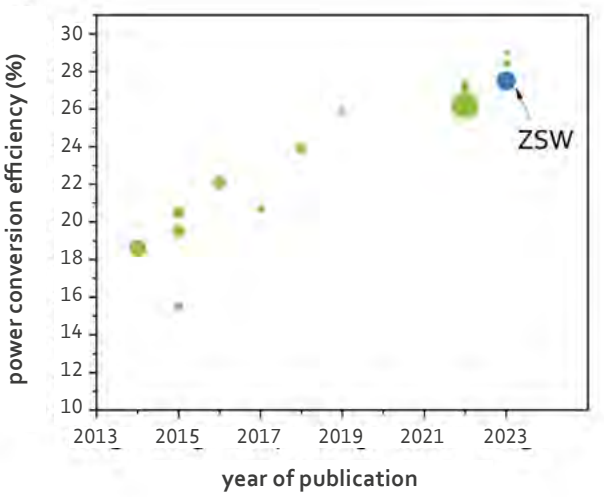
Die Perowskit-Dünnschichtphotovoltaik stellt eine neue Technologie für sehr kostengünstige und hocheffiziente Solarzellen dar, die u. a. aus einfachen Tinten bei niedrigen Temperaturen hergestellt werden können. Die Technologie wird international mit hoher Intensität erforscht und entwickelt sich stetig fort zu höheren Effizienzen und verbesserter Material- und Zellstabilität. Perowskit-Solarmodule sind nicht nur als Einzelmodule interessant, sondern insbesondere als Wirkungsgradbooster in Kombination mit etablierter Modultechnik wie Silizium oder Dünnschicht-PV wie CIGS.
Durch die Weiterentwicklung semitransparenter Perowskit-Solarzellen ist eine Steigerung der Effizienz auf 19,3 % bei gleichzeitiger hervorragender Transmission von nahezu 90 % im langwelligen Spektralbereich jenseits der Absorptionskante gelungen. Diese Zelle nutzt den blauen Anteil des Sonnenlichts. Eine darunter montierte CIGS-Zelle kann weiterhin den verbleibenden transmittierten roten Spektralbereich nutzen. Insgesamt wird in diesem Tandemverbund das Sonnenspektrum effizienter genutzt und so das Wirkungsgradlimit einer Einzelzelle überwunden. Beide Zellen weisen eine identische Fläche von 0,5 cm² auf und stellen als Tandem dieser Größe mit einer Effizienz von 27,5 % einen internationalen Bestwert für diese Zellkombination dar (siehe Abb. unten).

// Thin-film tandem solar cells made of perovskite and CIGS with over 27 % efficiency

Perovskite thin-film photovoltaics technology is a new way of producing very favourably priced and highly efficient solar cells by using, for example, simple inks at low temperatures. The technology is the subject of intense international research and is constantly evolving to achieve greater levels of efficiency and improved material and cell stability. Perovskite solar modules are not only interesting as stand-alone modules but also, most notably, as efficiency boosters in combination with established module technology like silicon or thin-film PV, such as CIGS.
The further development of semi-transparent perovskite solar cells has resulted in an increase in efficiency to 19.3 % alongside excellent transmission of almost 90 % in the long-wave spectral range beyond the absorption edge. This cell uses the blue light, allowing a CIGS cell mounted underneath to continue to use the remaining red spectral region. The solar spectrum is utilised more effectively as a whole in this tandem stack, thereby exceeding the efficiency limit of a single cell. Both cells have an identical surface area of 0.5 cm² and, as a tandem system of this size with an efficiency of 27.5 %, boast an international optimum value for this cell combination (see diagram).

Zeitliche Entwicklung der Tandem-Effizienz von Perowskit-CIGS-4T Solarzellen in der Literatur bei unterschiedlicher Zellfläche (als Größe des Punktes gekennzeichnet). Das ZSW stellt einen Bestwert für Subzellen mit einer Fläche von mind. 0,5 cm² dar.

Development of the tandem efficiency of 4T perovskite/CIGS solar cells through time in the literature with different cell areas (indicated by the size of the dots). The ZSW presents an optimum value for sub-cells with a minimum surface area of 0.5 cm².



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

// Doppelte Lichtausbeute mit transparenten Kontakten

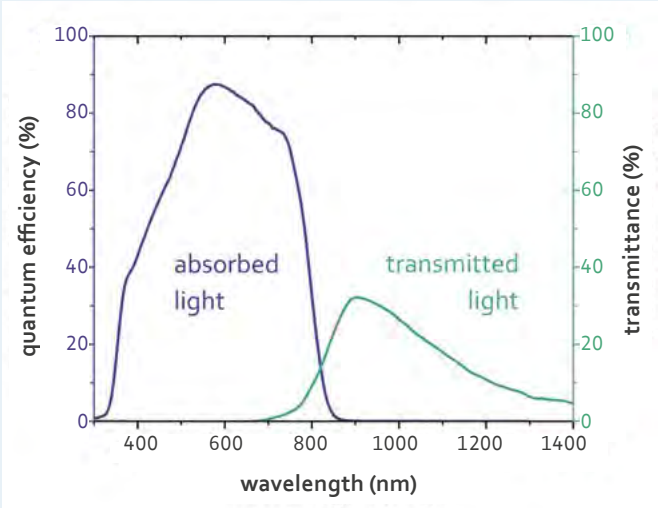
Zwei Trends kennzeichnen derzeit verstärkt die Solarforschung und -anwendung: bifaziale Solarzellen, bei denen von der Vorder- und Rückseite gleichzeitig Licht eingefangen wird, und Tandemzellen, bei denen Licht in zwei übereinanderliegenden Zellen umgewandelt wird. Beide Technologien erfordern, dass beide Seiten der Zelle transparent sind, d. h. Sonnenlicht beidseitig entweder ein- oder austreten kann. Die CIGS-Entwicklung im Fachgebiet MAT greift dieses Thema mit neuen transparenten Rückkontakten für Solarzellen auf.

CIGS-Zellen als Tandempartner zusammen mit einer Silizium (Si)-Unterzelle werden im europäischen Projekt »SITA« entwickelt. Hierbei absorbiert die CIGS-Oberzelle kurzwelliges Licht und bleibt dabei für langwelliges Licht durchlässig. Dieses Licht wird dann von der Si-Unterzelle umgewandelt, damit im Tandem die Effizienz höher ist als bei den einzelnen Technologien. Transparente Rückkontakte erfordern die Anpassung der Fabrikationsprozesse, damit der temperaturempfindliche Rückkontakt das Hochtemperaturwachstum der CIGS-Schicht gut übersteht. Bei den für ein Tandem nötigen Bandabständen von >1,45 eV werden Effizienzen von >12 % erreicht, wobei noch ca. 30 % des Lichtes oberhalb der Wellenlänge der Bandlücke durchgelassen werden (siehe Abb.). Im europäischen Projekt »Hi-BITS« wird der angepasste lichtdurchlässige Rückkontakt dafür verwendet, beidseitig Licht in die CIGS-Zelle zu koppeln. Mehr Licht bedeutet mehr Ladungsträger und somit eine höhere Effizienz. Um dies zu ermöglichen werden auch hier die Herstellungsprozesse und Materialien angepasst.

// Double light output with transparent contacts

Two trends are now increasingly dominating solar research and application. One is bifacial solar cells, in which light is captured from the front and back at the same time, and the other is tandem cells, in which light is converted in two cells on top of each other. Both technologies require both sides of the cell to be transparent, meaning that sunlight can either enter or exit on both sides. The CIGS development in the MAT department is moving in this direction with new transparent back contacts for solar cells.

CIGS cells paired with a silicon (Si) sub-cell are being developed in the European project »SITA«, where the top CIGS cell absorbs short-wave light and remains transparent to long-wave light. This light is then converted by the Si sub-cell therefore the degree of efficiency is higher in tandem than with the individual technologies. Transparent back contacts necessitate adjustments to the manufacturing processes to allow the temperature-sensitive back contact to withstand the high temperature growth of the CIGS layer. Efficiency levels of >12 % are reached with the band gaps of >1.45 eV required for a tandem arrangement, with approximately 30 % of the light still being transmitted above the wavelength of the band gap (see diagram). The adapted translucent back contact is used to introduce light into the CIGS cell on both sides in the European »Hi-BITS« project. More light means more charge carriers and therefore greater efficiency. The manufacturing processes and materials are also being adapted to make this possible.



Wellenlängenbereiche der Lichtabsorption und Stromerzeugung (illustriert durch die Quantenausbeute der Solarzelle, blaue Kurve) und der Lichttransmission (grüne Kurve) einer CIGS-Zelle mit transparentem Rückkontakt.

Wavelength ranges of light absorption and power generation, illustrated by the quantum yield of the solar cell (blue curve) and the light transmission (green curve) of a CIGS cell with transparent back contact.

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

// Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)
// Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)

// Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung der Qualität und Zuverlässigkeit von Photovoltaik (PV)-Modulen sowie die effiziente Nutzung des Solarstroms sind die Fokusthemen des Fachgebiets. Dies wird erreicht durch angepasste Messtechnik sowie eine digitale Modellierung von PV-Anlagen zur optimierten Betriebsführung und Einspeisung des Solarstroms in das Energiesystem.
Mit jahrzehntelanger Erfahrung werden im Testlabor Solab und auf dem Freiland-Testfeld Widderstall PV-Module und -Systeme hinsichtlich Leistung, Energieertrag und Alterungsverhalten untersucht. Mit der Testinfrastruktur können auch neue PV-Modul-Formate und -Technologien sowie bifaziale Module und Systeme geprüft werden. Bei der Qualitätsbewertung von PV-Modulen aus Solarparks stehen stichprobenartige Altersuntersuchungen wie auch Materialanalysen von kritischen Modulkomponenten wie Rückseitenfolien und Verkapselungsmaterialien im Fokus. Die Erkenntnisse fließen bei der Mitarbeit in Normungsgremien ein und kommen so unseren Kunden zugute. Das ZSW berät darüber hinaus bei der Planung, Ertragsberechnung, Optimierung und Qualitätssicherung von PV-Projekten.
Photovoltaiksysteme tragen wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung bei. Um die lokale Nutzung von Solarstrom zu erleichtern, entwickeln wir Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten sowie das Lademanagement für die Elektromobilität. Wir sind Entwicklungspartner bei der Anwendung entsprechender Algorithmen für den Netzbetrieb und den Energiemarkt. Weiterhin beraten wir gewerbliche Kunden auf dem Weg zur Klimaneutralität ihrer Dienstleistungen und Produkte.

// Our core areas of expertise

The main subjects of concern for the department are ensuring the quality and reliability of photovoltaic (PV) modules and facilitating the efficient use of solar power. The methods adopted to this end include bespoke measurement technology and digital modelling of PV systems with a view to optimising operational control and feeding the solar power into the energy system.
Decades of experience come into play in studying the performance, energy yield and ageing behaviour of PV modules and PV systems in the Solab test laboratory and on the Widderstall outdoor test site. The test infrastructure can also be used to investigate new PV module formats and technologies as well as bifacial modules and systems. When assessing the quality of PV modules from solar farms, the focus is on examining the ageing of modules chosen at random and on analysing the materials used for critical module components, such as backsheets and encapsulation materials. The findings are incorporated into our work in standardisation bodies and benefit our customers. The ZSW also advises on design, yield calculation, optimisation and quality control in the planning of PV projects.
Photovoltaic systems make a significant contribution to sustainable power supply. We are developing algorithms for the optimised operation of generators, storage facilities and supplies in order to facilitate the local use of solar power, and for the management of charging systems for electric vehicles. We are contributing to the development and application of appropriate algorithms for grid operation and the energy market. We also advise commercial customers on the route to climate neutrality in their services and products.

Dr.-Ing. Jann Binder
Head of Department
jann.binder@zsw-bw.de
+49 711 7870-209

»Wir unterstützen Sie bei der Qualitätssicherung von PV-Modulen und -Anlagen und deren effizientem Betrieb.«

»We can help you with quality control in respect of PV modules and systems and their efficient operation.«

Solar-Testfeld Widderstall.

Widderstall solar test site.

// Solar-Testfeld Widderstall

Das Solar-Testfeld des ZSW in Widderstall bei Merklingen wird seit 1989 für Langzeitstudien von PV-Modulen und -Systemen mit verschiedenen PV-Absorber-Materialien unter realen Einstrahlungs- und Witterungsbedingungen genutzt. Die daraus gewonnenen Daten ermöglichen gezielte Untersuchungen der Modul- und System-Performance sowie von Degradations- und Alterungsmechanismen. Rückkopplungen der Felddaten mit Resultaten von Labor- und standardisierten Qualitätstests im ZSW-eigenen Testlabor Solab erlauben eine optimale Angleichung der Labortestverfahren an reale Bedingungen.
Durch Anpassung der Testfeld-Infrastruktur und des Solab an größere PV-Modul-Formate sowie die neuesten Zell-Technologien wie Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon), Heterojunction (HJT) und Interdigitated Back Contact (IBC) ist das ZSW in der Lage, der Marktentwicklung zu folgen und PV-Module dieser neuen Generation korrekt zu testen und zu vermessen.
Im Rahmen eines Kundenprojekts wurde ein Versuchsstand installiert (siehe Abb. unten), der eine vergleichende Langzeitbewertung von verschiedenen, kommerziellen bifazialen Modulen hinsichtlich ihres Mehrertrages und Temperaturverhaltens in einer konkreten Dachinstallation ermöglicht. Erste Auswertungen zeigen den Vorteil der geringeren Temperaturkoeffizienten und des höheren Bifazialfaktors von neuesten, auf n-Typ-TOPCon-Zelltechnologie basierenden PV-Modulen gegenüber bifazialen p-Typ-Modulen.

// Widderstall solar test site

The ZSW solar test site in Widderstall near Merklingen has been used since 1989 for long-term studies on PV modules and systems with different PV absorber materials under real irradiation and weather conditions. The data obtained from these studies enable targeted analysis of module and system performance and of degradation and ageing mechanisms. Linking the field data back to results from laboratory tests and standardised quality tests in the ZSW Solab test laboratory makes it possible to optimise the laboratory test procedures and bring them into line with real conditions.
By adapting the test site infrastructure and the Solab to larger PV module formats and to the latest cell technologies, such as Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon), Heterojunction (HJT) and Interdigitated Back Contact (IBC), the ZSW is able to follow the market trend and to conduct accurate testing and dimensioning of PV modules of this new generation.
A test rig was installed as part of a project commissioned by a customer (see fig. below) and enables a long-term evaluation of various commercial bifacial modules, comparing their additional yield and reaction to changes in temperature in a specific rooftop installation. Initial appraisals show the advantage of the lower temperature coefficients and the higher bifacial factor of the latest PV modules based on n-type TOPCon cell technology as compared to bifacial p-type modules.

Vergleichende Untersuchung des bifazialen Mehrertrages sowie des Temperaturverhaltens von unterschiedlichen n-Typ- und p-Typ-PV-Modulen auf zwei verschiedenen Untergründen (hell vorne im Bild sowie hinten dunkel) im Rahmen eines Kundenauftrages.

Comparative study of the bifacial additional yield and reaction to changes in temperature of different n-type and p-type PV modules on two different backgrounds (light at the front in the picture and dark at the back) conducted on behalf of a customer.

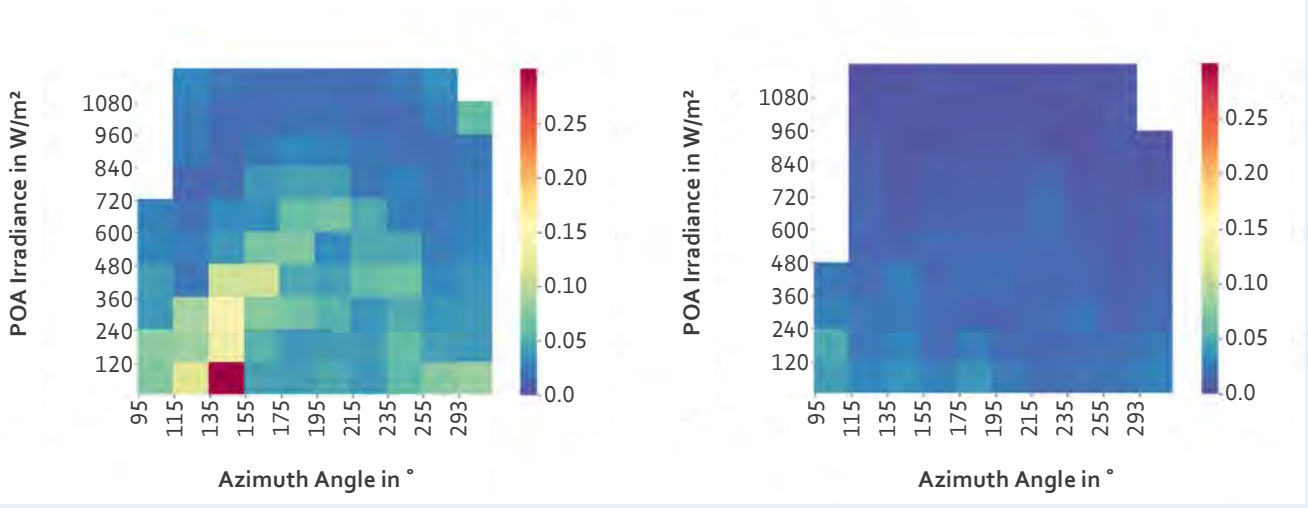
Roland Einhaus
roland.einhaus@zsw-bw.de
+49 711 7870-254

// KI-basiertes PV-Monitoring für bifaziale Systeme

Die Kosten für bifaziale PV-Module, die auch (vom Untergrund reflektierte) Einstrahlung auf die Modulrückseite in Solarstrom wandeln, sind nur moderat höher als für vergleichbare monofaziale Module. Bifaziale PV-Module gewinnen daher immer mehr an Bedeutung. Insbesondere bei Montage auf hellen Untergründen mit etwas Abstand können bifaziale PV-Systeme signifikante Mehrerträge gegenüber monofazialen PV-Systemen erzeugen. Dem höheren Energieertrag stehen jedoch die komplexeren Einstrahlungsbedingungen auf der Rückseite der Module gegenüber, die eine Herausforderung für die Vorhersage der Erzeugung und das Anlagenmonitoring darstellen. Das ZSW betreibt auf dem Testfeld am Widderstall eine bifaziale PV-Anlage, deren Erzeugungsleistung und meteorologische Umgebungsbedingungen kontinuierlich gemessen werden. Auf dieser Datengrundlage wurden unterschiedliche Modellierungsansätze untersucht und mit den real gemessenen Daten verglichen. Wie in der Abbildung links dargestellt, weist die physikalische Modellierung mittels dem Eindiodenmodell bei niedrigen Einstrahlungen und einigen Azimutwinkelbereichen einen hohen Modellfehler auf. Die KI-basierte Modellierung (Abbildung rechts) zeigt diese hohen Fehler nicht. Neben dem geringen Modellfehler, der entscheidend für ein zuverlässiges Monitoring ist, werden für das generische KI-basierte Modell im Vergleich zum physikalischen Modell keine detaillierten Modulparameter benötigt, die unter anderem hersteller- und technologieabhängig sind.

// AI-based PV monitoring for bifacial systems

The price of bifacial PV modules, which also convert radiation (reflected from the background) onto the back of the module into solar power, is only moderately higher than the price of comparable monofacial modules. Bifacial PV modules are therefore increasingly coming to the fore. The additional yield generated by bifacial PV systems, especially when installed on light-coloured surfaces with some separation, is significant when compared with monofacial PV systems. The higher energy yield is offset by the more complex irradiation conditions on the back of the modules, however, which pose a challenge for production forecasting and system monitoring. The ZSW operates a bifacial PV system on the test site at Widderstall, continuously measuring its generating capacity and the meteorological conditions of its surroundings. Different modelling approaches were studied on the basis of these data and compared with the real data measurements. As shown in the diagram on the left, there is a high physical modelling error at low irradiance levels and in some azimuth angle ranges with the one-diode model. The AI-based modelling (right-hand diagram) does not show this high level of error. The low modelling error is crucial for reliable monitoring. Furthermore, unlike the physical model, the generic AI-based model does not require any detailed module parameters which depend on the manufacturer and technology, to name but two factors.



Darstellung des relativen Fehlers (nRMSE – normalized Root Mean Square Error) über Azimutwinkel und Einstrahlung auf der Modulebene (POA – Plane of Array) bei der physikalischen Modellierung (links) und datengetriebener Modellierung (rechts). Grafik: ZSW.

Graphs showing the relative error (NRMSE – normalised root mean square error) over azimuth angle and irradiation at module level (plane of array (POA)) in physical modelling (left) and data-driven modelling (right). Diagrams: ZSW.

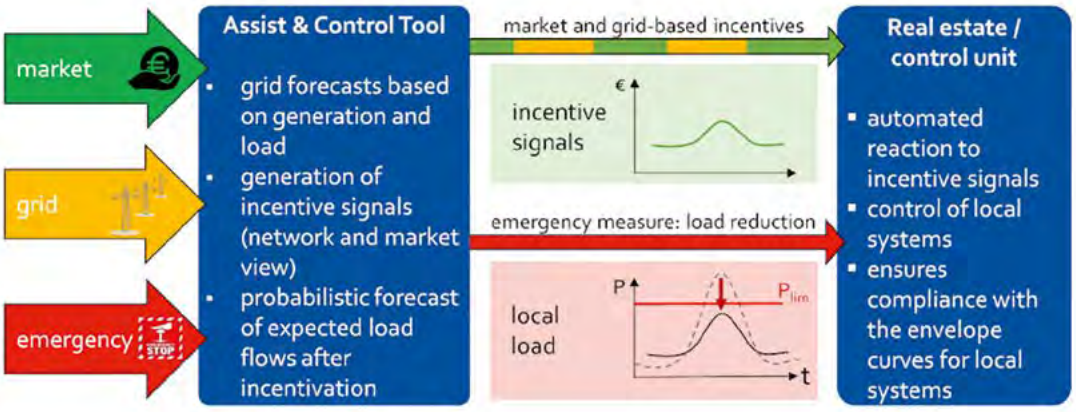
Jonas Petzschmann
jonas.petzschmann@zsw-bw.de
+49 711 7870-160

// Aktivierung von Flexibilitätspotenzialen

Die wachsende Elektrifizierung der Sektoren Verkehr und Wärme erhöht den Transportbedarf für Strom in den Netzen. Wenn neue Verbraucher wie Wärmepumpen und Ladepunkte für Elektrofahrzeuge mit hoher Gleichzeitigkeit einschalten, werden die Netze zusätzlich belastet: Hintergrund ist, dass sich zeitvariable Stromtarife derzeit am Energiemarkt (grüner Pfeil in der Abbildung unten) orientieren, z. B. mit niedrigen Strompreisen bei hohem Angebot von Wind- und Sonnenstrom. Smarte Technologien ermöglichen es dabei den Stromkunden, Ladevorgänge und Wärmepumpennutzungen automatisch in günstige Zeiten zu verschieben.
Bei vermehrter Nutzung dieser Option innerhalb eines Netzgebiets können zwar Endkunden Geld sparen, jedoch drohen Netzengpässe. Um diese vermeiden zu können, forscht das ZSW zusammen mit Partnern aus Industrie, Netzbetreibern und Wissenschaft an der Aktivierung von Flexibilitätspotenzialen zur Netzentlastung. Dies wird durch Schnittstellen zwischen den einzelnen Akteuren und einem Algorithmus ermöglicht, der Preissignale für flexible Verbraucher auf Basis von Energiemarkt- und Netzsignalen setzt, damit die Nutzung von Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen so angereizt wird, dass ein stabiler Netzbetrieb gewährleistet und damit die Abschaltung oder Drosselung von Verbrauchern nur noch im Notfall (roter Pfeil in der Abb. unten) erforderlich ist, um Netzüberlastungen zu verhindern.
Die Arbeiten werden im Rahmen des Projekts »Connect, Assist & Control: Transparenz und Systemstabilität für Smart Energy Systeme« (CACTUS) vom Bundeswirtschaftsministerium gefördert.

// Exploitation of flexibility potential

The growing electrification of the transport and heating sectors is increasing the demand for the transfer of electricity to the networks. Additional strain is put on the grid when new consumers like heat pumps and charging points for electric vehicles are increasingly drawing on supplies at the same time. Varying electricity tariffs for different times are historically and currently based on the energy market (green arrow in the diagram below), e.g. electricity prices are low when the supply of wind power and solar power is high. Smart technologies enable electricity customers to automatically postpone charging processes and heat pump use to cheaper times.
As the exercise of this option increases within a supply network, end customers may be able to save money but there is a risk of grid congestion. In order to avoid this, the ZSW is conducting research with partners from industry, grid operators and scientists on the exploitation of flexibility potential with a view to easing the strain on the grid. This will be made possible through interfaces between the individuals involved and an algorithm which sets price signals for flexible consumers based on energy market signals and network signals, thereby incentivising the use of electric vehicles and heat pumps in such a way as to guarantee stable grid operation and to limit the need to switch off or restrict consumers to emergencies only (red arrow in the diagram below) in order to prevent grid overload.
The work is being funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action as part of the CACTUS project (»Connect, Assist & Control: Transparency and System Stability for Smart Energy Systems«).



Erzeugung von markt- und netzbasierten Anreizsignalen, um eine erzwungene Reduktion der Last als Notfallmaßnahme möglichst zu vermeiden.

Generation of market-based and grid-based incentive signals in order to avoid forced load reduction as an emergency measure as far as possible.

Christian Tomschitz
christian.tomschitz@zsw-bw.de
+49 711 7870-321

// Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)
// Renewable Fuels and Processes (REG)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet REG entwickelt anwendungsnahe Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff und synthetischen Folgeprodukten wie regenerativen Kraftstoffen oder chemischen Rohstoffen im Kontext von Power-to-X (eFuels). In unserem Technikum werden dafür anwendungsnahe Technologiebausteine im technischen Maßstab umgesetzt und erprobt.
Unser Fokus im Bereich Wasserstoff liegt dabei auf serientauglichen und skalierbaren Materialien und Fertigungsmethoden für Alkalische Elektrolyseure. Wir verfügen über eigene Elektrolysestack- und -systemtechnologien bis in den MW-Maßstab. Unseren Kunden und Partnern bieten wir vielfältige Testmöglichkeiten vom Material bis zum multi-MW-Stack, sowohl in den ZSW-eigenen Laboren (ElyLab) als auch in Realumgebung.
Als Kernelement für die Herstellung von eFuels entwickeln wir Verfahren zur effizienten, regenerativen CO_2-Bereitstellung aus der Luft (Direct Air Capture) oder biogenen Reststoffen und verfügen u. a. im Bereich von Syntheseprozessen für Methan oder Methanol über langjährige Erfahrungen.
Mit unserem Engineering- und System-Know-how haben wir bereits mehrere eigene Elektrolyse- und Power-to-X-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 25 kW_{el} und 1 MW_{el} am ZSW errichtet und betrieben. Industriekunden beraten wir vom Komponenten-Engineering bis zur Inbetriebsetzung kommerzieller Komplettanlagen und beim anschließenden Technologie-Monitoring.
Neben unseren Elektrolyse- und Power-to-X-Aktivitäten entwickeln wir innovative Verfahren zu Kreislauf- und Recycling-Prozessen im Kontext der Circular Economy. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Phosphor-Rückgewinnung und dem rohstofflichen Recycling von Kunststoffabfällen.

// Our core areas of expertise

The REG department develops technologies with practical applications in mind for the production of hydrogen and synthetic derivatives like renewable fuels or chemicals in the power-to-X context (e-fuels). Technology modules related to applications in this field are put into practice and tested on an industrial scale in our pilot plant.
Our focus in relation to hydrogen is on reproducible and scalable materials and manufacturing methods for alkaline electrolysers. We have our own electrolysis stack and electrolysis system technologies reaching the MW scale. We offer our customers and partners a wide range of facilities for tests on materials right through to multi-MW stacks, both in the ZSW laboratories (ElyLab) and in a real-world environment. Our development of processes for an efficient renewable supply of CO_2 from the air (direct air capture) or from biogenic residues is a core element for the production of e-fuels, and we have many years of experience in various technologies, including synthesis processes for methane or methanol.
Our engineering and system know-how has already been invested in the construction and operation of several in-house electrolysis and power-to-X systems at the ZSW, with output ranging between 25 kW_{el} and 1 MW_{el}. We advise industrial customers from the point of component engineering right through to the commissioning of turnkey commercial systems and on the follow-up monitoring of systems.
In addition to our work on electrolysis and power-to-X systems, we are developing innovative processes for closed loop and recycling processes in the context of the circular economy with a focus on phosphorus recovery and the recycling of plastic waste in raw material form.

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

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

»Our in-house developments and test facilities allow us to work with industry on electrolysis, e-fuels and recycling processes and accelerate the routes to market for these technologies of the future.«

Phosphor-Rückgewinnung in der Kläranlage.

Recovery of phosphorus at the sewage plant.

// Phosphor-Recycling: Vom ZSW-Technikum in die Anwendung

Phosphor ist ein nicht substituierbares Element für Pflanzen sowie Menschen und Tiere, die Phosphor über die Nahrung aufnehmen. Gleichzeitig wird Phosphor als Rohstoff benötigt, insbesondere zur Herstellung von Dünger. Aufgrund begrenzter natürlicher Vorkommen und der hohen Abhängigkeit Europas von Importen aus zum Teil politisch instabilen Regionen ist Phosphor als kritischer Rohstoff eingestuft. Umso wichtiger ist es, Phosphor zu recyceln. So kann in Deutschland etwa die Hälfte des Mineraldüngerbedarfs durch die Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlämmen gedeckt werden.
Das Fachgebiet REG hat deshalb gemeinsam mit Partnern eine innovative Wirbelschicht-Klärschlammverbrennung entwickelt, bei der durch Zugabe von Alkali-Additiven die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors deutlich erhöht wird. Die Verbrennungsbedingungen können so eingestellt werden, dass zusätzlich Schwermetalle mobilisiert werden. Die phosphorhaltige Asche wird im Rauchgas als Flugasche ausgetragen und anschließend bei hohen Temperaturen von >700 °C abgeschieden. Rund 80 % des Phosphors können als Wertstoff mit hoher Pflanzenverfügbarkeit und geringen Schwermetallgehalten zurückgewonnen werden, wie Topf- und Feldversuche zeigen. Nach der Vorvalidierung im ZSW-Technikum (15 kW_{th}) konnte die Technologie in den 1-Megawatt-Pilotmaßstab skaliert werden. Die Anlage wird beim Abwasserzweckverband Staufener Bucht in Baden-Württemberg in 2024 in Betrieb genommen.

// Phosphorus recycling: from ZSW pilot plant to application

Phosphorus is a non-substitutable element for plants and for humans and animals who or which ingest phosphorus through food. At the same time, phosphorus is needed as a raw material, especially for the production of fertiliser. Natural reserves of this resource are limited and Europe is highly dependent on imports from sometimes politically unstable regions, and so phosphorus is classified as a critical raw material. It is therefore all the more important to recycle phosphorus. Around half of the mineral fertiliser demand in Germany can be met by the recovery of phosphorus from sewage sludge.
The REG department and its partners have therefore developed an innovative fluidised bed sewage sludge incineration facility in which the plant availability of phosphorus is significantly increased by the incorporation of alkali additives. The incineration conditions can be adjusted in such a way as to allow the mobilisation of heavy metals during the process as well. The ash containing the phosphorus is carried in the flue gas as fly ash and is then separated at high temperatures of >700 °C. Around 80 % of the phosphorus can be recovered and is valued as a material with high plant availability and low heavy metal content, as pot experiments and field tests show. Following preliminary validation in the ZSW pilot plant (15 kW_{th}) it was possible to ramp up the technology to the 1-megawatt pilot scale. The system will be put into operation at the Staufener Bucht sewage treatment association in Baden-Württemberg in 2024.

Phosphorrecycling-Anlage.

Phosphorus recycling plant.

Dr.-Ing. Jochen Brellochs
jochen.brellochs@zsw-bw.de
+49 711 7870-211

// »Elektrolyse made in Baden-Württemberg« wird fortgesetzt

Ziel des vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts »Elektrolyse made in Baden-Württemberg« war es, die Wettbewerbsfähigkeit baden-württembergischer Unternehmen im Bereich Elektrolyse zu stärken und die Industrialisierung der Technologie auf Landesebene voranzutreiben. Am ZSW wurde dafür ein Elektrolyseur in der 1-MW_{el}-Leistungsklasse als Schaufenster für die Industriepotenziale aufgebaut. Mehr als 40 Firmen aus Baden-Württemberg haben Komponenten in den Systemdemonstrator eingebracht. Über 70 Unternehmen wurden in einem begleitenden Industriedialog zur Elektrolysetechnologie und den technischen Anforderungen der einzelnen Baugruppen informiert. Bis Mitte 2023 konnten dadurch bereits etwa ein Dutzend Produktentwicklungen im Bereich Elektrolyse auf Landesebene initiiert werden.
Im Rahmen der vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Modellregion H2-GeNeSiS wird der erfolgreiche Industriedialog fortgesetzt und der Demonstrator in realer Einsatzumgebung erprobt. In der Modellregion wird eine etwa 10 km lange H_2-Pipeline entlang des Neckars zwischen Stuttgart und Esslingen aufgebaut, um mehrere Elektrolyseure und verschiedene Wasserstoff-Abnehmer miteinander zu einem »H_2-Marktplatz« zu vernetzen. Auch die »Elektrolyse made in Baden-Württemberg« soll ab 2026 Wasserstoff in die Pipeline einspeisen.

// »Electrolysis Made in Baden-Württemberg« to be continued

The aims of the »Electrolysis Made in Baden-Württemberg« project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, were to strengthen the competitiveness of Baden-Württemberg enterprises in the field of electrolysis and to advance the roll-out of the technology on an industrial scale in the federal state. With these objectives in mind, an electrolyser in the 1-MW_{el} performance class was set up at the ZSW to showcase the industrial potential. More than 40 companies from Baden-Württemberg have contributed components to the demonstration system. Over 70 companies joined in a wider discussion around the subject in industry where they were given information about electrolysis technology and the specifications to be met by the individual components. This had already enabled the development of around a dozen products in the field of electrolysis in the federal state by the middle of 2023. The successful talks at industry level will be continued in the context of the H2-GeNeSiS model region, which is being funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, and the demonstration system will be tested in a real operational environment. An H_2 pipeline approximately 10 km long is being constructed in the model region along the river Neckar between Stuttgart and Esslingen in order to connect several electrolysers and link various hydrogen buyers with each other to form an »H_2 marketplace«. »Electrolysis Made in Baden-Württemberg« is also expected to supply hydrogen to the pipeline from 2026 onwards.

Systemdemonstrator »Elektrolyse made in Baden-Württemberg«.

»Electrolysis Made in Baden-Württemberg« demonstration system.

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

Im ElyLab werden sowohl Leistungsfähigkeit als auch Lebensdauer von Elektrolyseuren erprobt.

Both performance ability and service life of electrolysers are tested in the ElyLab.

// Testfeld- und Innovationszentrum Elektrolyse (ElyLab)

Die zentralen Herausforderungen bei der elektrolytischen Wasserstoff-Erzeugung sind die Realisierung eines hohen elektrischen Wirkungsgrades sowie der Einsatz langlebiger, kostengünstiger Materialien. Wichtige F&E-Aufgaben sind daher die Charakterisierung von Elektroden und katalytisch aktiven Elektrodenbeschichtungen sowie die Erprobung innovativer Komponenten und Materialien (z. B. Zellrahmen, Dichtungen oder Membranen). Ziel dabei ist es, Innovationen und Vorprodukte unter möglichst realen Betriebsbedingungen in verschiedenen Größenklassen zu validieren, um die Ergebnisse dann in Produkte im technisch relevanten Maßstab überführen zu können.
Am ZSW ist in den vergangenen Jahren ein Testfeld entstanden, welches die umfassende Charakterisierung und Untersuchung von Materialien für die alkalische Elektrolyse bis hin zu Elektrolysestacks im multi-MW-Design ermöglicht. Für die Untersuchungen stehen verschiedene Teststände in allen relevanten Leistungsklassen zur Verfügung. In den Jahren 2022 und 2023 wurden die Testkapazitäten mehr als verdoppelt. Der jüngste Ausbau ermöglicht nun auch Tests von Elektrolysestacks mit bis zu 4 m² Elektrodenfläche. Die Testkapazitäten werden sowohl für Forschungsvorhaben als auch für Industriekunden eingesetzt. Dabei deckt das ElyLab am ZSW von der Materialanalytik bis hin zu Großprüfständen mit bis zu 20.000 Ampere eine einmalige Bandbreite ab und bietet in Verbindung mit den F&E-Aktivitäten des ZSW ein sehr gutes Innovationsumfeld.

// Testing and innovation centre for electrolysis (ElyLab)

The central challenges in the generation of hydrogen by electrolysis lie in achieving a high level of electrical efficiency and in using durable and inexpensive materials. The main R&D remit therefore involves the characterisation of electrodes and catalytically active electrode coatings and the testing of innovative components and materials (e.g. cell frames, gaskets or membranes). The aim is to run validation processes for innovations and preliminary products in operating conditions which are as realistic as possible in various size categories in order to be able to transfer the results to products on the relevant industrial scale.

A test site has been developed at the ZSW in recent years, enabling the full characterisation and investigation of materials for alkaline electrolysis right through to electrolysis stacks of a multi-MW design. Various test rigs in all the relevant performance classes are available for the research. The testing capacity was more than doubled in 2022 and 2023. Tests on electrolysis stacks with up to 4 m² of electrode surface are now possible following the latest expansion. The testing capacity is used both for research projects and for industrial customers. The scope of the ElyLab at the ZSW is unique, with facilities for material analysis right through to large test rigs with up to 20,000 amperes and, in conjunction with the R&D work at the ZSW, offers an excellent seedbed for innovation.

Neueste Steuerungstechnik und eine integrierte Datenaufbereitung ermöglichen einen 24/7-Betrieb mit Echtzeit-Visualisierung der Betriebsdaten.

State-of-the-art control systems and integrated data processing allow 24/7 operation with real-time visualization of operating data.

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

// Akkumulatoren Materialforschung (ECM)
// Accumulators Materials Research (ECM)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECM entwickelt Materialien und Prozesse für die nächste Generation von Lithium-Ionen-Batterien sowie alternative Speichertechnologien wie Natrium-Ionen und Post-Lithium-Systeme mit Magnesium oder Kalzium. Die Substitution kritischer Rohstoffe und das Recycling von Batteriematerialien sind weitere wichtige Aspekte.
Ein Alleinstellungsmerkmal ist die Möglichkeit der Hochskalierung der Pulversynthese in den Pilotmaßstab. Im Rahmen des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekts »Powder-Up!« wird der Aufbau eines Technikums zur Synthese von Kathodenmaterialien von 10 kg bis 100 kg vorangetrieben. Ziel ist die Errichtung einer modularen, industrienahen Forschungsproduktionsanlage zur Herstellung wettbewerbsfähiger Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. Das Technikum, dessen Bau 2023 mit Hochdruck betrieben wurde, wird im September 2024 in Betrieb gehen.
ECM entwickelt neue Prozesse für die Elektrodenherstellung, um giftige Lösungsmittel zu vermeiden und wasserbasierte, PFAS-freie Binder zu verwenden. Eine neue Pilotanlage für die Trockenprozessierung mit Extruder, Direktbeschichtung und Kalandrierung wurde erfolgreich installiert. Die Elektroden werden in kleinen Pouch- oder zylindrischen Zellen der Formate 18650 und 21700 evaluiert. Für die Wickelzellen steht die Adaptierung neuer Fertigungsprozesse zur Optimierung des Zelldesigns in Bezug auf Energieinhalt und Leistung im Vordergrund. Zur Bewertung neuer Zellen und für Schadensanalysen ist das Fachgebiet auf die Weiterentwicklung von Post-mortem-Analysen und inline-Methoden spezialisiert. Sie sind essenziell für das Verständnis von Alterungsprozessen, potenziellen Sicherheitsrisiken sowie für die Optimierung des Zelldesigns.

// Our core areas of expertise

The ECM department develops materials and processes for the next generation of lithium-ion batteries, including alternative storage technologies such as sodium-ion and post-lithium systems with magnesium or calcium. The substitution of critical raw materials and the recycling of battery materials are further important aspects.
A unique selling point is the ability to scale up powder synthesis to pilot scale. As part of the »Powder-Up!« project funded by the German Federal Ministry of Education and Research, the set-up of a pilot plant for the synthesis of cathode materials in the 10 kg to 100 kg range is being driven forward. The aim is to establish a modular, industry-oriented research production line for the manufacture of competitive cathode materials for lithium-ion batteries. The technical centre, which was built at full speed in 2023, will go into operation in September 2024.
ECM is developing new processes for electrode manufacturing in an effort to avoid toxic solvents and use water-based PFAS-free binders. A new pilot plant for dry processing with extruder, direct coating and calendering has been successfully installed. The electrodes will be evaluated in small pouch or cylindrical cells in the 18650 and 21700 formats. For the winding cells, the focus is on adapting new production processes to optimise the cell design in terms of energy content and performance. For the evaluation of new cells and for damage analyses, the department specialises in the further development of post-mortem analyses and the further development of inline methods. These are essential for understanding ageing processes, potential safety risks and for optimising cell design.

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

»Der Aufbau einer vollständigen Kreislaufwirtschaft für Energiespeicher eröffnet neue wettbewerbsfähige Zukunftsperspektiven für Europa und bietet enorme Potenziale zur Ressourcen- und Energieeinsparung.«
»The completion of a proper circular economy for energy storage will open up new prospects for Europe in terms of future competitiveness and will offer enormous potential for the conservation of resources and energy.«

// Analyseworkflows für die effiziente Erkennung von Lithium-Plating in Lithium-Ionen-Batterien

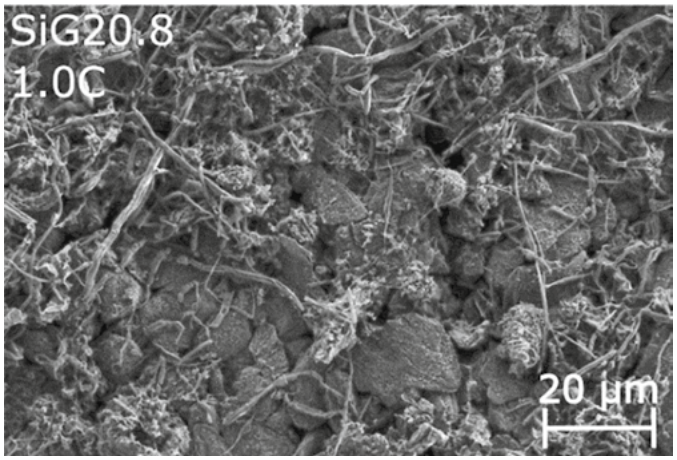
Das vom ZSW mitkoordinierte Kompetenzcluster AQua ist Teil des Dachkonzepts des Bundesforschungsministeriums zur Batterieforschung. Ziel des Clusters ist es, ein umfassendes, prozessübergreifendes Verständnis der Eigenschafts-Struktur-Beziehungen zwischen Materialien, Betriebsparametern, Fertigungsschritten und elektrochemischen Eigenschaften zu erarbeiten. In insgesamt elf Forschungsprojekten, von denen das ZSW an fünf direkt beteiligt ist, arbeiten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an der Bereitstellung fertigungsbegleitender und fertigungsintegrierter Analyseverfahren für eine nachhaltige und kostengünstige Batteriezellfertigung in Deutschland.

Im Projekt »Charakterisierung von Li-Abscheidungen auf Graphitanoden und Si/Graphit-Kompositanoden (CharLiSiKo)« wurde ein »Best Practice«-Workflow zur Erkennung von unerwünschten Lithiumabscheidungen auf Anoden entwickelt (s. Abb. unten). Die Workflowentwicklung fokussierte sich auf Methodenvergleiche und Fehlerbetrachtungen. Dabei zeigte sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung der ermittelten Daten der physikalisch-chemischen Analyse von Li-Abscheidungen auf Anoden, unabhängig davon, ob sie nach Ladung bei tiefen Temperaturen oder nach Schnellladung erfolgten. Durch Verbindung der komplementären Methoden konnten wichtige Trends identifiziert werden, um die Alterung von Lithium-Ionen-Zellen zu verlangsamen und so die Lebensdauer und die Nachhaltigkeit und Sicherheit zu erhöhen.

// Analysis workflow for efficient detection of lithium plating in lithium-ion batteries

The AQua research cluster, which is jointly coordinated by the ZSW, is a body of excellence within the umbrella strategy for battery research adopted by the Federal Ministry of Education and Research. The aim of the cluster is to develop an understanding spanning the full breadth of processes and unpacking the correlations between materials, operating parameters, manufacturing steps and electrochemical properties in terms of attributes and structures. In a total of eleven research projects, of which the ZSW is directly involved in five, scientists are working on the provision of manufacturing-related and production-integrated analysis processes for sustainable and cost-effective battery cell production in Germany.

A »best practice« workflow was developed in the »CharLiSiKo« project with a view to detecting unwanted lithium deposits on anodes (see fig. below). The focus when developing the workflow was on comparing methods and analysing possible sources of error. There is a high level of correlation between the data obtained from the physical and chemical analysis of Li deposits on anodes after charging at low temperatures, or after rapid charging. The combination of the complementary methods led to the discovery of key developments with a tendency to slow down the ageing of lithium-ion cells and thereby increase the service life, sustainability and safety.



Rasterelektronenmikroskopische Messung einer Silizium-Graphitanode (20,8 % Si) mit Li-Dendriten.

Scanning electron microscope measurement of a silicon/graphite anode (20.8% Si) with Li dendrites.

Weitere Informationen:
Further information:

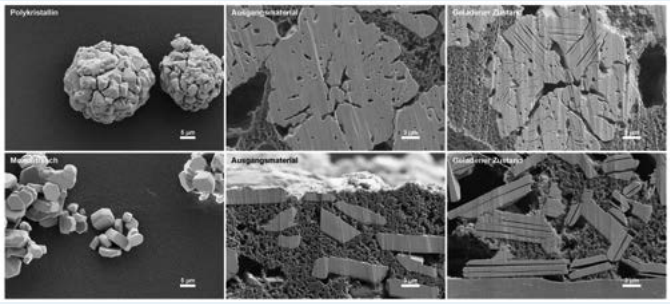
Dr. Thomas Waldmann
thomas.waldmann@zsw-bw.de
+49 731 9530-212

// Natrium-Ionen-Batterien: Alterungsphänomene an Kathodenmaterialien identifiziert

Natrium-Ionen-Batterien, eine neue, wiederaufladbare Speichertechnologie, bieten die Chance, den Einsatz kritischer Rohstoffe in Lithium-Ionen-Batterien wie Kobalt, Nickel, Lithium, Graphit und Kupfer stark zu reduzieren oder sogar vollständig zu vermeiden. Schichtoxide gelten derzeit als das beste Kathodenmaterial, um hohe Energiedichten zu erreichen. Allerdings altern diese Materialien sehr schnell. Das Verständnis der hierfür verantwortlichen Alterungsvorgänge steht derzeit im Fokus wissenschaftlicher Arbeiten.
Im Rahmen des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekts »Transition« (Natrium-Ionen Materialien und Demonstratoren für mobile und stationäre Energiespeicher) gelang es am ZSW erstmalig, alterungsrelevante Phänomene an P2-$Na_xMn_yNi_{1-y}O_2$-Schichtoxiden zu identifizieren und deren Einfluss auf Lebensdauer und Performanz zu erfassen. Dabei wurden die mechanische Degradation der Aktivmassekörner (µm-Maßstab) und die strukturelle Degradation an der Grenzfläche (atomarer Maßstab) als Alterungsursachen nachgewiesen. Diese Prozesse rühren von der Ein- und Auslagerung der Natriumionen her, was einen starken mechanischen Stress auf die Kristallstruktur ausübt und somit zu Rissbildung in den Kristallen führt (s. Abb. unten). Dotierungen und Beschichtungen erhöhen die Zyklenstabilität deutlich. Diese Arbeiten werden im Folgeprojekt »Transition-Transfer« (Bundesforschungsministerium) fortgeführt, um weiter optimierte Materialien in einem Folgeschritt für die Anwendung zu skalieren.

// Sodium-ion batteries: Ageing phenomena on cathode materials identified

Sodium-ion batteries, as a new and rechargeable storage technology, offer the opportunity to significantly reduce or even completely avoid the use of critical raw materials found in lithium-ion cells such as cobalt, nickel, lithium, graphite, and copper. Layered oxides are currently considered the best cathode material, to achieve high energy densities. However, these materials age very quickly. Understanding the ageing processes responsible for this is currently the focus of scientific work.
As part of the »Transition« project (Sodium-ion Materials and Demonstrators for Mobile and Stationary Energy Storage) funded by the German Federal Ministry of Education and Research, the ZSW has succeeded for the first time in identifying aging-relevant phenomena in P2-$Na_xMn_yNi_{1-y}O_2$ thin film oxides and assessing their influence on lifetime and performance. Mechanisms of mechanical degradation of active mass grains (at the micron scale) and interfacial structural degradation (at the atomic scale) have been identified as causes of ageing. These processes are attributed to the insertion and extraction of sodium ions, which exert significant mechanical stress on the crystal structure, leading to crack formation in the crystals (see figure below). Doping and coatings significantly improve cycle stability. These efforts will be continued in the follow-up project »Transition-Transfer« (Federal Ministry of Education and Research) to further scale up optimised materials for application.



Rissbildung als Alterungsursache in polykristallinen und monolithischen Natrium-Ionen-Schichtoxiden.

Crack formation as a cause of ageing in polycrystalline and monolithic sodium-ion layered oxides.

Weitere Informationen:
Further information:

Lukas Pfeiffer
lukas.pfeiffer@zsw-bw.de
+49 731 9530-229

Batterieprototypen im 21700-Format mit wässrig beschichteten nickelreichen Kathoden.

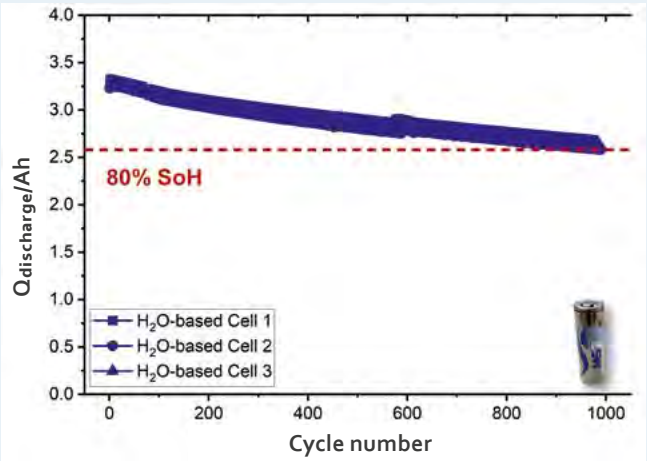
Battery prototypes in 21700 format with water-coated nickel-rich cathodes.

// Skalierung der wasserbasierten Elektrodenherstellung für PFAS-freie Lithium-Ionen-Batterien

Heutige Lithium-Ionen-Batterien verwenden Übergangsmetalloxide mit sehr hohem Nickelanteil als Kathodenmaterial, um möglichst hohe Energiedichten zu erzielen. Für die Elektrodenfertigung dieser Kathoden werden fluorierte Binder (PVDF) eingesetzt, die das toxisches Lösungsmittel NMP benötigen.
Eine kostengünstige und nachhaltigere Alternative ist die Verwendung wasserbasierter Binder. Der Einsatz von Wasser ermöglicht neben dem Wegfall von giftigen Lösungsmitteln auch die Nutzung von nichtfluorierten Bindern, was das Recycling von Batterien deutlich vereinfacht.
Im Rahmen des vom Bundesforschungsministeriums geförderten Projektes »DigiBatt Pro 4.0« wurde im Labormaßstab das Standard-Lösemittel/Binder-Gemisch NMP/PVDF durch eine wässrige Formulierung ersetzt. Anschließend wurden in einem Misch- und Beschichtungsprozess im produktionsnahen Pilotmaßstab ca. 100 m doppelseitig beschichtete Elektroden hergestellt. Als Aktivmaterial wurde ein Schichtoxid mit 83 % Nickel verwendet.
Die Elektroden wurden in zylindrischen 21700-Zellen eingesetzt (s. Abb. oben) und elektrochemisch validiert. Die Zellen zeichnen sich durch eine hohe Zyklenstabilität aus: nach 1.000 Zyklen weisen diese immer noch 80 % der Anfangskapazität auf (s. Abb. unten).

// Scaling of water-based electrode production for PFAS-free lithium-ion batteries

Modern-day lithium-ion batteries use transition metal oxides with a very high nickel content as cathode materials in order to achieve the highest possible energy density levels. Fluorinated binders (PVDF), which require the toxic solvent NMP, are used to manufacture the electrodes for these cathodes.
A cost-effective and more sustainable alternative is to use water-based binders. The use of water not only eliminates the need for toxic solvents but also enables the use of non-fluorinated binders which greatly simplifies the recycling of batteries.
As part of the »DigiBatt Pro 4.0« project funded by the German Federal Ministry of Education and Research, the standard solvent/binder mixture NMP/PVDF was replaced by an aqueous formulation on a laboratory scale. A mixing and coating process for nickel-rich cathodes was then developed on a pilot scale akin to production conditions, yielding 100 m of electrodes coated on both sides with a surface area capacity of 3.0 mAh cm^{-2}.
A layered oxide containing 83 % nickel was used as the active material.
The electrodes were placed in cylindrical 21700 cells (see fig. above) and were put through an electrochemical validation process. The cells boast a high degree of cycle stability.
After 1,000 cycles they still have 80 % of their initial capacity (see diagram below).



Die lösungsmittelfrei hergestellten Zellen weisen nach 1.000 Zyklen 80 % der Anfangskapazität auf.

The solvent-free cells retain 80 % of initial capacity after 1,000 cycles.

Weitere Informationen:
Further information:

Rares-George Scurtu
rares-george.scurtu@zsw-bw.de
+49 731 9530-545

// 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 der Arbeiten des Fachgebietes ECP liegt in der Weiterentwicklung von Herstellprozessen zur seriennahen Produktion von Batteriezellen. Hierfür betreibt das Fachgebiet seit neun Jahren eine europaweit einmalige »Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL)«. Im Zentrum stehen das Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit, Inline-Sensorik, Fertigungstoleranzen sowie kosteneffiziente Produktionsabläufe. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um die Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Maßstab.

Das ECP-Team besteht aus erfahrenen TechnikerInnen, IngenieurInnen und WissenschaftlerInnen, deren Kernaufgabe es ist, im Rahmen von Industrieaufträgen und Forschungsvorhaben industrielle Produktionsprozesse zu optimieren oder fortschrittliche Zellchemie in Musterserien von Standardzellen zu verifizieren. Mit seinen vielfältigen Produktionsanlagen wurde das Fachgebiet zum integralen Bestandteil im Dachkonzept »Forschungsfabrik Batterie« des Bundesforschungsministeriums, mit dem eine Batteriezellproduktion in Deutschland aufgebaut werden soll.

// Our core areas of expertise

The serial production of large lithium-ion cells, such as the ones used in electric cars or in stationary storage facilities, places particular demands on the safety and accuracy of the individual process steps. The higher the quality and reproducibility, the more reliable, long-lasting and cost-effective the battery will be. The focus of the work of the ECP department is on the further development of manufacturing processes for the pre-series production of battery cells. For the last nine years, the department has been operating a »research platform for the industrial production of large lithium-ion cells« (FPL) which is the only one of its kind in Europe. The work revolves around the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in relation to quality, safety, manufacturing costs, in-line sensors, production tolerances and cost-efficient processes. When it comes to new materials and components, the emphasis is on the evaluation of processability and quality on an industrial scale.

The ECP team is made up of experienced technicians, engineers and scientists whose main brief is to optimise industrial production processes in the context of industrial contracts and research projects and to verify advanced cell chemistry in lines of standard cell samples. Given the wide variety of production facilities, the department has become integral to the »Battery Cell Research Factory« umbrella strategy adopted by the Federal Ministry of Education and Research with a view to stepping up battery cell production in Germany.

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

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

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

Laser-Schneideanlage zur formatflexiblen Elektrodenfertigung.

Laser cutting system for format-flexible electrode production.

// Sicherheitsstandards, um die Ausschussquote in der Massenproduktion herabzusetzen

Für eine erfolgreiche Batteriezellproduktion ist es unerlässlich, die Qualitätssicherung als ganzheitliche Disziplin auf allen Ebenen der Materialherstellung, -prozessierung und -assemblierung der fertigen Zelle zu betrachten und weiter zu entwickeln. Nur so lässt sich kritischer Ausschuss vermeiden und eine zukünftige Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit für den Standort Deutschland als Zellhersteller insbesondere in der Automobilindustrie gewährleisten.

Das vom Bundesforschungsministerium im Rahmen des Kompetenzclusters für Analytik und Qualitätssicherung (AQua) geförderte Projekt »QuaLiZell« beschäftigt sich mit der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) und Qualitätssicherung zu sicherheitskritischen Aspekten der Produktion von großformatigen prismatischen Lithium-Ionen-Zellen.
Ziel ist, sicherheitsrelevante Fehlerquellen in den Schneid- und Assemblier-Prozessen zu identifizieren und die Wirkzusammenhänge aufzuklären. Toleranz- und Eingriffsgrenzen in den Prozessen werden quantifiziert und geeignete analytische In-Line-Methoden entwickelt, um Produktionsfehler frühzeitig zu erkennen und so die Ausschussquote in der Massenproduktion herabzusetzen. Dadurch können Qualität, Sicherheit und Produktionskosten gezielt optimiert und neue Entwicklungen auf Material- oder Zellebene deutlich schneller und sicherer in die Massenproduktion überführt werden.

// Safety-related quality control in cell assembly

It is essential for successful battery cell production to view quality control as a discipline in its entirety and develop it at all levels of material production, material processing and assembly of the finished cell. This is the only way to avoid critical rejects and ensure Germany's future competitiveness as a cell manufacturer, especially in the automotive industry.

The QuaLiZell project, funded by the Federal Ministry of Education and Research and involving the Battery Competence Cluster for Analytics and Quality Assurance (AQua), deals with Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and quality control in relation to safety-critical aspects of the production of large prismatic lithium-ion cells.
The aims are to identify sources of error relevant to safety in the cutting and assembly processes and to explain the cause-and-effect relationships. Tolerance thresholds and intervention limits in the processes are quantified and suitable analytical in-line methods are developed in order to detect manufacturing errors at an early stage and thereby reduce the reject rate in mass production. This allows targeted optimisation of quality, safety and production costs and enables much more speed and safety in the transfer of new developments at material or cell level to mass production.

Laservereinzelung von Elektrodenblättern für die Herstellung von großen Lithium-Ionen-Zellen.

Laser singulation of electrode sheets in the production of large lithium-ion cells.

Dr. Hartmut Bruglachner
hartmut.bruglachner@zsw-bw.de
+49 731 9530-360

// Beschleunigte Zellaktivierung durch intelligente Formierungskonzepte

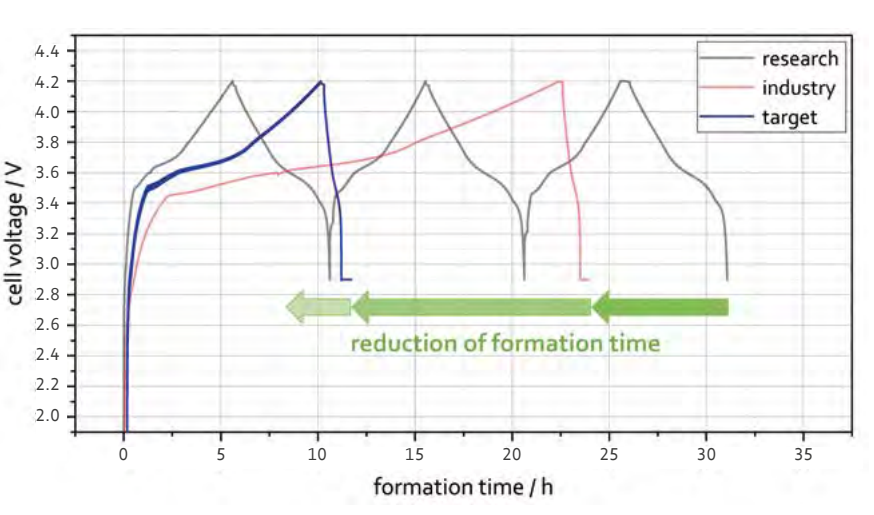
Die Zellaktivierung und -prüfung ist der letzte entscheidende Produktionsschritt, welcher maßgeblich über die spätere Leistung, Sicherheit und Langlebigkeit einer Batteriezelle entscheidet. Der sogenannte Formierungsprozess ist zugleich auch einer der zeit- und damit kostenintensivsten Verfahrensschritte in der gesamten Herstellungskette. In der Serienproduktion ist eine Prozessdauer von mehreren Tagen inklusive der abschließenden Qualitätskontrolle (End-of-Line-Test) dabei nicht unüblich, was entsprechend hohe Kosten und Kapitalbindung in der Produktion verursacht.

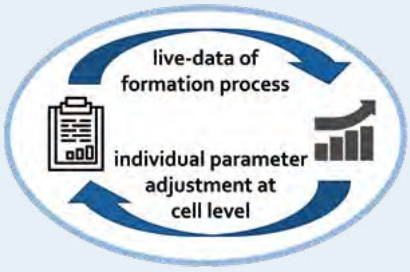
In dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt »Entwicklung intelligenter Formieranlagen zur Optimierung und Diagnose von Zelleigenschaften (InForm)« werden intelligente Formierstrategien entwickelt, um die Prozessdauer zu verkürzen und gleichzeitig eine Steigerung der Zellqualität und Lebensdauer zu erreichen. Durch eine innovative Prozesssteuerung mit Hilfe Künstlicher Intelligenz können die Prozessparameter (Strom, Spannung, Zeit) live angepasst werden, die Formierung beschleunigt sich und schädliche Degradationsmechanismen werden bereits im Vorfeld verhindert. Die Produktivität und Ausbeute in der Zellformation wird dadurch signifikant gesteigert.

// Accelerated cell activation through intelligent formation concepts

Cell activation and cell testing make up the last crucial production step which will determine the subsequent performance, safety and longevity of a battery cell. The formation process, as it is called, is also one of the most time-consuming and therefore most cost-intensive steps in the entire manufacturing chain. A process time of several days including the final quality inspection (end-of-line test) is not uncommon in series production, incurring correspondingly high costs and tying up capital in production.

Intelligent forming strategies are being developed in the InForm project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research, in an attempt to shorten the process time and at the same time achieve an increase in cell quality and service life. The use of innovative process control aided by artificial intelligence allows the live adjustment and acceleration of the process parameters (current, voltage, time) and the prevention of harmful degradation mechanisms in advance. This significantly increases the productivity and yield in cell formation.





Verkürzte Prozessdauer bei der Zell-Formierung im Projekt InForm durch individuelle Live-Anpassung der Prozessparameter auf Zellebene.

Shortened process time for cell formation in the InForm project through live customisation of process parameters at cell level.

Markus Blessing
markus.blessing@zsw-bw.de
+49 731 9530-361

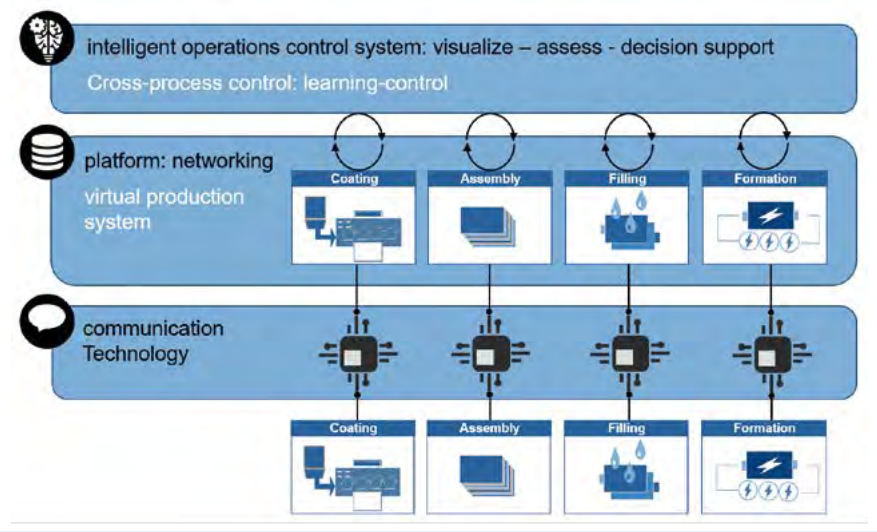
// Aufbau eines virtuellen Produktionssystems für Batteriezellen

Eine der größten Herausforderungen in der Batteriezellproduktion ist die Steigerung der Qualität bei gleichzeitiger Kostensenkung. Gerade große Lithium-Ionen-Zellen sind schon bei kleinsten Fehlern in der Herstellung sehr störanfällig, was sich negativ auf die Sicherheit, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Zellen auswirkt. Ziel des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projektes »Entwicklung virtueller Produktionssysteme in der Batteriezellfertigung zur prozessübergreifenden Produktionssteuerung (ViPro)« ist es, in Zusammenarbeit mit weiteren Forschungsinstituten ein modellbasiertes, virtuelles Abbild der Batteriezellfertigung zu erstellen, um Optimierungsansätze im virtuellen Raum realitätsnah und risikoarm zu erproben und die Qualität und Herstellkosten der Produkte gezielt verbessern zu können.
Ein weiterer Fokus in ViPro liegt auf der Quantifizierung komplexer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zur Steigerung der Produktivität und Effizienz. Beispielsweise können Teilprozesse mit starken Wechselwirkungen und hoher Schwankungsbreite simuliert werden, die an den Folgeprozess weitergegeben werden und sich somit erst zu einem späteren Zeitpunkt auf die Zelleigenschaften auswirken. Das virtuelle Produktionssystem in ViPro bildet die Prozessschritte Beschichtung, Assemblierung, Elektrolytbefüllung und Formierung modellbasiert ab (siehe Abb.).

// Development of a virtual battery cell production system

One of the biggest challenges in battery cell production is to increase quality while reducing costs at the same time. Large lithium-ion cells, in particular, are highly sensible to even the smallest manufacturing failures, which can have a negative impact on the safety, performance and lifetime of the cells. The aim of the ViPro project, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research, is to generate a model-based virtual image of battery cell production in collaboration with other research institutes in order to test ways of approaching optimisation in virtual space in a realistic manner with little risk and in order to be able to focus on improving the quality and manufacturing costs of the products.

Another key objective in ViPro is to quantify complex cause-and-effect relationships with a view to increasing productivity and efficiency. It is possible, for example, to simulate certain processes with strong interactions and a high fluctuation range which are relayed to the subsequent process and therefore only affect the cell properties at a later point in time. The virtual production system in ViPro maps the coating, assembly, electrolyte filling and formation sequences, basing these process steps on models (see diagram).



Virtuelles Abbild der Batteriezellproduktion in ViPro.

Virtual image of battery cell production in ViPro.

Sebastian Nägele
sebastian.naegele@zsw-bw.de
+49 731 9530-167

// Akkumulatoren (ECA)
// Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECA betreibt das Batterietestfeld am ZSW und untersucht elektrochemische Zellen, Module sowie Energiespeichersysteme bis 1.000 V und 360 kW. Die Charakterisierung der elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie die Untersuchung des Verhaltens im Fehlerfall oder in Unfallsituationen steht im Mittelpunkt unserer Arbeiten. Die betrachteten Einsatzbereiche der Batterien umfassen die mobile und stationäre Energiespeicherung, insbesondere den Einsatz in elektrifizierten Antriebssträngen von Fahrzeugen – ob zu Land, zu Wasser oder für die Luftfahrt.

In den Teams für elektrische Tests werden Zellen, Module und Systeme beispielsweise auf Funktionalität geprüft, deren Leistungsfähigkeit vermessen und die zu erwartende Lebensdauer bestimmt. Mittels zerstörender Tests werden im Team »Safety« Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen beurteilt. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Unterdrückung der Fehlerausbreitung durch thermische Propagation im System. Dazu betreiben wir drei Sicherheitstestbunker inklusive einer mehrstufigen Abgasreinigung. Herzstück des Teams »Batteriesystemtechnik« ist die thermische und elektrische Simulation von Zellen und Batteriesystemen inklusive von Algorithmen für den Batteriezustand und das Batteriemanagement. Erforscht werden weiterhin die optimale Laderegelung 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 cells, modules and energy storage systems up to 1,000 V and 360 kW. We focus in our work on characterising the electrical, thermal and mechanical properties under different operating conditions and on investigating behaviour and response in cases of failure or in accidents. In terms of the applications for which the batteries are used, consideration is given to mobile and stationary energy storage, especially in electrified power trains in vehicles – whether on land, on water or for aviation.

The electrical testing teams carry out tests on cells, modules and systems, checking that they are working properly and measuring their performance, for example, and calculating their expected service life. The »Safety« team uses destructive tests to assess the potential risks to which accumulators might be exposed in case of extreme damage. One focal point is the suppression of fault propagation through thermal runaway in the system. We operate three safety test bunkers for this purpose, including a multistage exhaust gas cleaning system. The »Battery System Engineering« 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 of mechanical compression forces on the performance, the expected service life and safety.

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

»Im Batterietestzentrum des ZSW ist die technische Infrastruktur über viele Jahre dauerhaft gewachsen und stellt damit zusammen mit der vorhandenen Erfahrung ein leistungsfähiges Angebot dar, das von unseren Kunden gern genutzt wird.«

»The battery testing section at the ZSW has seen its technical infrastructure grow steadily over many years, duly complemented by the experience that has been gathered, and offers an efficient service which is well received and willingly used by our customers.«

Produktüberblick Proteba GmbH: Propagationsschutz-barrieren und Vergussmaterialien.

Products in the Proteba GmbH range: anti-propagation barriers and potting compounds.

// Start-Up für Propagationsschutz in Batterien gegründet

Im Jahr 2023 konnte das Start-Up Proteba GmbH von Mitarbeitern des Fachgebietes ECA erfolgreich ins Leben gerufen werden. Mit dem Abschluss des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten EXIST-Projektes »Endothermic Safety Concept (ESCO)« wurden die wesentlichen Voraussetzungen dafür geschaffen, dass das Start-Up seinen eigenständigen wirtschaftlichen Weg gehen kann. Im Projekt ESCO wurden neuartige Konzepte zur Propagationsunterdrückung in großen Lithium-Ionen-Energiespeichern entwickelt. Solche Batterien werden heute in vielen Anwendungen wie in Fahrzeugen bzw. zur stationären Energiespeicherung genutzt.
Ebenfalls wurden im Projekt jene Prozessschritte weiterentwickelt, die zur Serienproduktion von Propagationsschutzbarrieren vollständig beherrscht werden müssen. Die sehr dünnen und flexiblen Barrieren auf Basis von endothermen Materialien können auch bei großformatigen Lithium-Ionen-Zellen die Propagation sicher und dauerhaft verhindern. Damit setzten sich die von der Proteba GmbH hergestellten Barrieren positiv vom aktuellen Stand der Technik ab. Denn die derzeit genutzten Barrieren verwenden im Wesentlichen lediglich hohe thermische Widerstände, die die Propagation zwar verzögern, jedoch nicht verhindern können.

Wir wünschen den Kollegen der Proteba GmbH eine erfolgreiche Zukunft in einem sich beständig weiter entwickelnden Markt von Energiespeichern.

// Start-up for propagation suppression in batteries

Proteba GmbH was started up in 2023 by employees from the ECA department. Upon completion of the EXIST project »Endothermic Safety Concept (ESCO)«, which was funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, the basic prerequisites were in place for the start-up to be able to tread its own commercial path. Novel systems for the suppression of propagation in large lithium-ion energy storage systems had been developed in the ESCO project. Such batteries are now used in many applications, e.g. in vehicles or for stationary energy storage.
Further work was also done in the project on the development of the process steps requiring full control for the series production of anti-propagation barriers. The very thin and flexible barriers based on endothermic materials can safely and permanently prevent propagation, even in large lithium-ion cells. This is the distinguishing feature of the barriers manufactured by Proteba GmbH, setting them apart from the systems available at present. The barriers currently used essentially only employ high thermal resistance levels which may delay propagation but cannot prevent it.

We wish Proteba GmbH a successful future in the constantly evolving energy storage market.

Die Gründer der Proteba GmbH: Dr. Daniel Becher (links) und Dr. Marius Bauer (rechts).

The founders of Proteba GmbH: Dr. Daniel Becher (left) and Dr. Marius Bauer (right).

Dr. Marius Bauer
marius.bauer@proteba-battery.de
+49 731 9530-588

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)
// Fuel Cell Fundamentals (ECG)

// Unsere Kernkompetenzen

Die kostengünstige Energiespeicherung sowie Wasserstofferzeugung und -nutzung sind Kernthemen der Energiewende. Das Fachgebiet ECG untersucht neue Konzepte für kostengünstige wiederaufladbare Batterien mit wässrigen Elektrolyten sowie Elektroden für Brennstoffzellen und Elektrolyseure mit Polymermembranelektrolyt. Ein weiterer Fokus liegt auf dem Einsatz fluorfreier Polymerelektrolyte und Analysen zur Bildung von Deckschichten und zum Korrosionsverhalten metallischer Materialien.
Die experimentellen Arbeiten erfolgen vorwiegend an Modellelektroden und Modellzellen und werden mittels mathematischer Modellierung und Simulation sowie durch Tests in Vollformatzellen und Stacks unterstützt. Röntgen, Synchrotron- und Neutronentomographie erlauben in-operando-Einblicke während des Betriebs von Batterie-, Elektrolyse- und Brennstoffzellen. Zur Bestimmung der Elektrodenmikrostrukturen, im Neuzustand wie auch im Verlauf der Betriebsdauer, kommen die hochauflösende Bildgebung über Elektronenmikroskopie sowie tomographische Methoden zum Einsatz.
Das Fachgebiet ECG verfügt über langjährige Erfahrung mitsamt Infrastruktur, um völlig neue technologische Ansätze aufzugreifen und diese im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren. Der Einsatz neuer Materialien und Herstellverfahren erlaubt die Entwicklung umweltfreundlicher und leistungsstarker Energiespeichertechnologien und den Einsatz umweltfreundlicher, recyclingfähiger und in großen Mengen vorhandener Rohstoffe.

// Our core areas of expertise

Cost-effective energy storage and hydrogen production/use are key aspects of the energy transition. Within the ECG department, we are investigating novel approaches for low-cost rechargeable batteries using aqueous electrolytes, as well as electrodes for fuel cells and electrolysers using polymer membrane electrolytes. Another focus is on the use of fluorine-free polymer electrolytes and analyses of the formation of cover layers and the corrosion behaviour of metallic materials.
The experimental work is mainly carried out on model electrodes and model cells with the added support of mathematical modelling and simulation as well as supplementary tests in full-size cells and stacks. X-ray, synchrotron and neutron tomography allow in-operando insights into battery cells, electrolysis cells and fuel cells. High-resolution imaging methods using electron microscopes and tomography are applied in order to examine the electrode microstructures, both when new and in the course of their service life.
The ECG department has many years of experience and also the infrastructure to adopt completely new approaches and to verify and demonstrate the technologies in the laboratory. The deployment of new materials and manufacturing processes will allow the development of environmentally-friendly and high-capacity energy storage technologies and the use of eco-friendly and recyclable raw materials of which there is a plentiful supply.

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

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

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

3-zelliger PEM-Elektrolysestack auf dem Prüfstand.

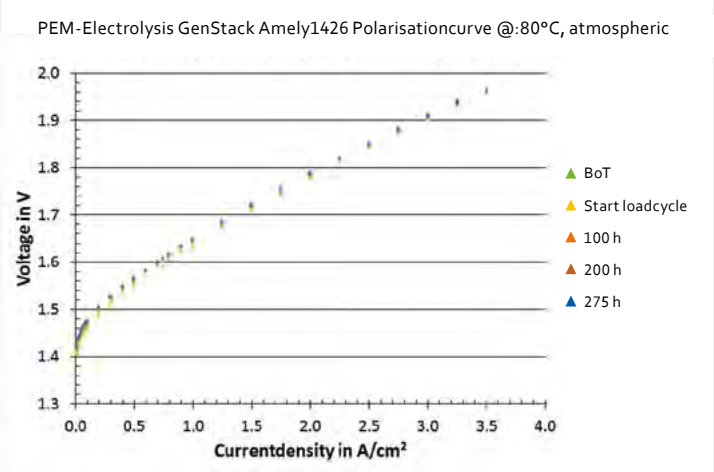
Triple-cell PEM electrolysis stack on the test rig.

// Stackprototyp für die PEM-Elektrolyse

Elektrolyseure mit Polymerelektrolytmembran (PEMEL) können im Betrieb der schwankenden Verfügbarkeit von Grünstrom sehr gut folgen. In solchen Elektrolyseuren wird heute aus Gründen der Korrosionsstabilität das relativ teure Titan in großem Umfang als Strukturwerkstoff eingesetzt. In einem aus ZSW-Eigenmitteln finanzierten Projekt wurde das Standzeitverhalten kostengünstiger beschichteter Edelstahlplatten untersucht.
Als Stackplattform wurde der im Rahmen des HyFaB-Projekts entwickelte »generische Stack« eingesetzt (s. Abb. oben).
In einem ersten Schritt wurde die Herstellung der katalysatorbeschichteten Membranen (CCM) für hohe Katalysatorbeladungen optimiert. Eine speziell entwickelte und stabile Katalysatortinte wurde anschließend über ein Rakelverfahren auf eine Fläche von bis zu 300 cm² skaliert. Über einen Heißpressschritt wurden die Katalysatorschichten anschließend auf die Nafion-115-Membran übertragen.
Die so hergestellten CCM wurden mit der für den generischen Stack entwickelten Fertigungsanlage in eine Randverstärkungsfolie einlaminiert und mit einer platinierten Titan-PTL (Porous Transport Layer – auf Anode) und einer Gas Diffusion Layer (GDL – Kathode) zu einer 7-Lagen-MEA (membrane electrode assembly) komplettiert und in einem 3-zelligen Stapel für mehr als 1.000 Stunden unter stark schwankenden Bedingungen erfolgreich getestet. Erste Strom-Spannungskennlinien zeigen eine dem Stand der Technik entsprechende Leistungscharakteristik und einen sehr stabilen Betrieb über mehrere hundert Stunden (s. Abb. unten).

// Stack prototype for PEM electrolysis

Electrolysers with polymer electrolyte membranes (PEMEL) can follow the fluctuating availability of green electricity very well during operation. For reasons of corrosion stability, the relatively expensive titanium is now widely used as a structural material in such electrolysers. In a project financed by ZSW's own funds, the service life behaviour of cost-effective coated stainless steel plates was investigated.
In a first step, the production of the catalyst-coated membranes (CCM) was optimised for high catalyst loads. A specially developed and stable catalyst ink was then scaled to an area of up to 300 cm² using a doctor blade process. The catalyst layers were then transferred to the Nafion 115 membrane using a hot pressing step.
The CCMs produced in this way were laminated into an edge reinforcement film using the production system developed for the generic stack and completed with a platinised titanium PTL (porous transport layer – on the anode) and a gas diffusion layer (GDL – cathode) to form a 7-layer MEA (membrane electrode assembly) and successfully tested in a 3-cell stack for more than 1,000 hours under highly fluctuating conditions.
The first current-voltage curve shows performance characteristics in line with the latest available technology. No significant performance degradation was observed over several hundred hours of operation in a dynamic load cycle (see diagram).



Kennlinien über 275 Stunden.

Characteristic curve over 275 hours.

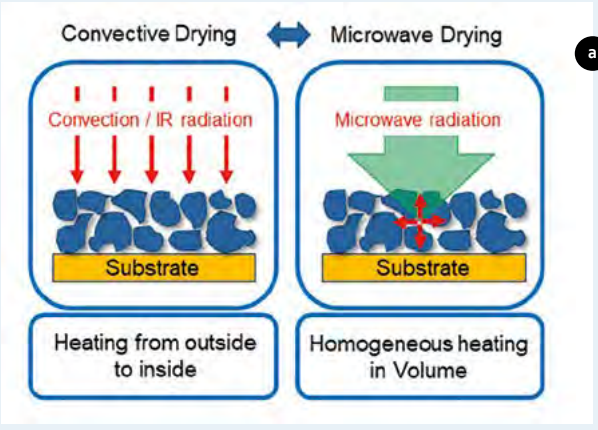
Michael Liebert
michael.liebert@zsw-bw.de
+49 731 9530-216

// Energieeffiziente Trocknung von Katalysatorschichten für Brennstoffzellen

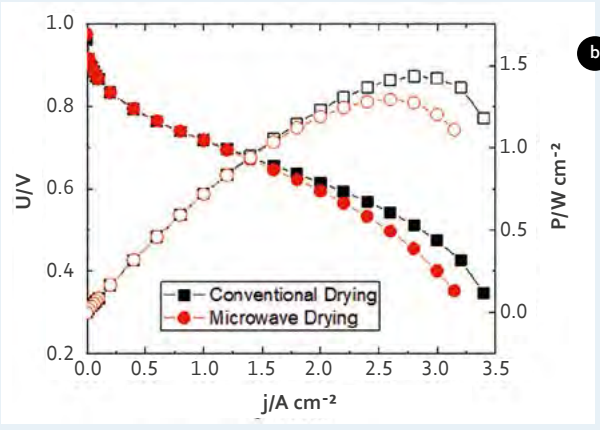
Das »Herzstück« eines Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEFC)- und Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEEL)-Stapels sind die Membran-Elektroden-Einheiten (MEA). Im Zentrum der heutigen MEA, wie sie beispielsweise in Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieben eingesetzt werden, steht die sogenannte »Catalyst Coated Membrane (CCM)«. Diese CCM muss von homogener Dicke, riss- und spannungsfrei sowie fest und defektfrei mit der Elektrolytmembran verbunden sein.
Die Trocknung von nass aufgetragenen CCM-Schichten erfolgt heute meist mit Heißluft, beginnend von der äußeren Oberfläche. Dies birgt die Gefahr von Rissbildung und Schollenbruch. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Trocknung mittels Mikrowellenstrahlung einen homogenen Energieeintrag und somit eine gleichmäßige, jedoch spannungsfreie Trocknung (Abb. a).
Im Rahmen des vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Projektes »Mikrowellentrocknung von Katalysatorschichten für Brennstoffzellen und Elektrolyseure (MiKaBrezEl)« wird in enger Zusammenarbeit mit der Industrie der Einfluss einer solchen Mikrowellentrocknung auf die Schichtmorphologie und die Leistungseigenschaften von CCM erforscht (s. Abb. a).
In ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine effiziente, homogene und energiesparende Trocknung mit Mikrowellenstrahlung unter Vermeidung von Schichtdefekten möglich ist und die so hergestellten CCM-Schichten die gewünschte Performance zeigen (s. Abb. b). Laufende Arbeiten im Projektrahmen umfassen eine weitere Optimierung der Prozess- und Rezeptparameter mit dem Ziel einer signifikanten Einsparung von Energie bei gleichzeitig verbesserter Produktqualität.

// Energy-efficient drying of catalyst layers for fuel cells

The membrane electrode assemblies (MEA) form the »heart« of a polymer electrolyte fuel cell (PEFC) and of a polymer electrolyte membrane electrolysis (PEEL) stack. The »catalyst-coated membrane (CCM)« is at the centre of the MEA, as used today in vehicles with fuel cell drives.
This CCM must be of homogeneous thickness, free of cracks and stresses and firmly connected to the electrolyte membrane without defects. Today, wet-applied CCM layers are usually dried with hot air, starting from the outer surface. This harbours the risk of cracking and clod fracture. In contrast, drying by means of microwave radiation enables a homogeneous energy input and therefore also uniform, but stress-free drying (diagram a).
As part of the project »Microwave Drying of Catalyst Layers for Fuel Cells and Electrolysers (MiKaBrezEl)« funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, the influence of such microwave drying on the layer morphology and performance characteristics of CCM is being investigated in close collaboration with industry (see diagram a). In initial experiments, it was demonstrated that efficient, homogeneous, and energysaving drying with microwave radiation, while avoiding layer defects, is possible, and the CCM layers produced in this way exhibit the desired performance (see diagram b). Ongoing work within the project framework includes further optimization of process and recipe parameters with the aim of significant energy savings while simultaneously improving product quality.



Konzept konventionelle vs. Mikrowellentrocknung.
Conventional drying system contrasted with microwave drying process.



Strom-Spannungskurvenvergleich von konventionell und mit Mikrowellen getrockneten Katalysatorschichten.
Current density and voltage graph comparing catalyst layers dried conventionally and with microwaves.

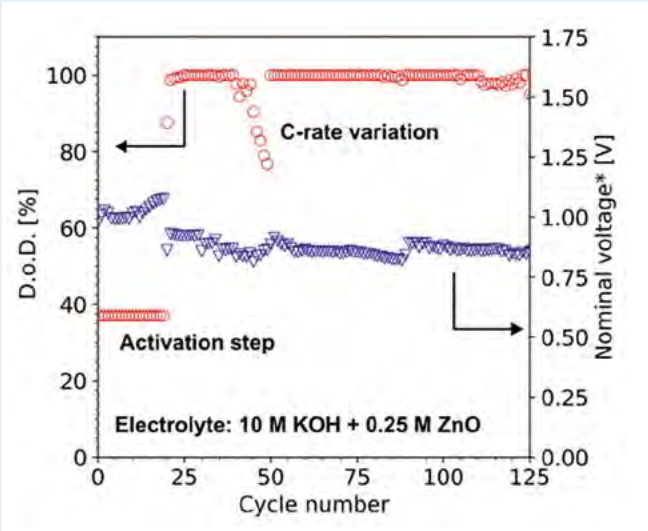
Dr. Emanuel Heider
emanuel.heider@zsw-bw.de
+49 731 9530-246

// Wiederaufladbare Akkumulatoren mit Zink-Elektrode

Wiederaufladbare Batterien basierend auf Zink-Elektroden in wässrigen Elektrolyten weisen vielversprechendere Eigenschaften als stationäre Energiespeicher auf. Gleichzeitig sind sie kostengünstig und benötigen weniger kritische Rohstoffe als Lithium-Ionen-Batterien. Zinkbasierte Batterien versprechen eine preiswerte und nachhaltige Alternative zur Speicherung elektrischer Energie aus fluktuierenden erneuerbaren Quellen zu werden, vorausgesetzt, es gelingt ihre Zyklenfestigkeit im Langzeitbetrieb aufrecht zu erhalten.
Obwohl primäre (nicht wiederaufladbare) Zink-Mangandioxid-Batterien und Zink-Luft-Batterien als industrielle Serienprodukte in jedem Supermarkt erhältlich sind, konnten beide Technologien bislang nicht als wiederaufladbare, zyklenfeste Batterien hergestellt werden. Dies liegt unter anderem an einer Zink-Vergiftung des in beiden Batterietypen eingesetzten Aktivmaterials Mangandioxid.
Am ZSW werden parallel Forschungsprojekte zur Entwicklung von wiederaufladbaren Zink-Mangandioxid-, Zink-Luft- und Zink-Nickeloxid-Batterien durchgeführt, die mit Mitteln des Bundesforschungsministeriums und der Europäischen Union gefördert werden. Im Rahmen dieser Vorhaben ist es gelungen, sowohl einen Membranseparator zu identifizieren, der den Transport von Zinkationen wirksam blockiert und eine Mangandioxidelektrodenstruktur aufweist. Erste Funktionsmuster der Laborzellen konnten für mehr als 100 Lade-/Entladezyklen betrieben werden (s. Abb.).

// Rechargeable batteries with zinc electrode

The properties of rechargeable batteries based on zinc electrodes in aqueous electrolytes show great promise for stationary energy storage devices. They are also inexpensive and require fewer critical raw materials than lithium-ion batteries. Zinc-based batteries look set to be a cheap and sustainable alternative to storing electrical energy from fluctuating renewable sources, provided that they can be persuaded to maintain their cycle stability in long-term operation.
Although basic (non-rechargeable) zinc-manganese dioxide batteries and zinc-air batteries are mass produced for sale in every supermarket, neither technology has yet been harnessed for the manufacture of rechargeable deep-cycle batteries. This is due to various factors, including the zinc toxicity of manganese dioxide, the active material used in both battery types. Parallel research projects are being carried out at the ZSW with a view to developing rechargeable zinc-manganese dioxide, zinc-air and zinc-nickel oxide batteries and are funded by the Federal Ministry of Education and Research and the European Union. Two successful outcomes of these projects have been the identification of a membrane separation process which effectively blocks the transport of zinc ions and the development of a manganese dioxide electrode structure which remains stable for over 100 charge/discharge cycles and is now being demonstrated in zinc-manganese dioxide laboratory cells (see diagram).



Entladekapazität (D.o.D.) einer Mangandioxid-Elektrode (in % Nominalkapazität) bei aufeinanderfolgenden Lade-Entlade-Zyklen unter der Annahme, dass keine Polarisation an der Zink-Elektrode auftritt.

Discharge capacity (D.o.D.) of a manganese dioxide electrode (in % nominal capacity) for successive charge-discharge cycles assuming no polarisation at the zinc electrode.

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

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

// Brennstoffzellen Stacks (ECB)
// Fuel Cell Stacks (ECB)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECB ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen. Im Zentrum stehen die Konstruktion, Charakterisierung und Simulation von Brennstoffzellenstacks und -komponenten im Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 150 kW_{el}. Eine weitere Kernkompetenz liegt im Bau von Prototypen und auf der Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Entwicklungsarbeiten bei der Stack-Assemblierung im Rahmen des HyFaB-Projekts.
Im Fokus der Brennstoffzellenoptimierung stehen Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Dies beinhaltet die eingehende Untersuchung und Vorhersage von Alterungsprozessen sowie die Fehleranalyse.
Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen lässt sich mittels einer µ-CT-Anlage untersuchen und validieren.
Ergänzend stehen am ZSW vorhandene Analysetechniken (z. B. FIB-SEM) sowie das mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Verfügung. Diese Verfahren bieten zeitliche und räumliche Auflösungen, die zu den besten weltweit gehören.

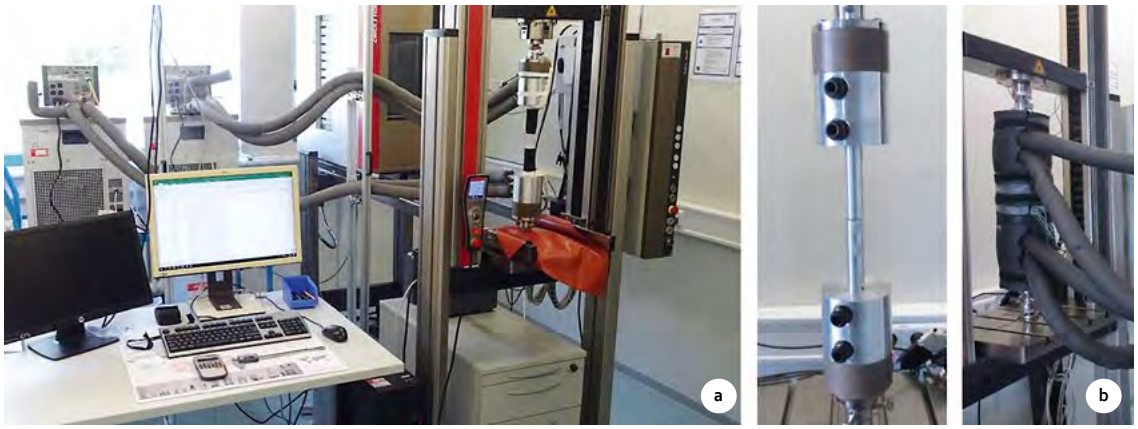
// Our core areas of expertise

The ECB department specialises in the development of PEM 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 150 kW_{el}. Other key specialisms include the construction of prototypes and the development of manufacturing and testing technologies. One aspect of particular importance here is the development work on stack assembly in the HyFaB project.
Fuel cell optimization targets performance, lifespan, efficiency, and compactness, involving in-depth examination and prediction of aging processes and failure analysis.
Component structures and operating conditions can be swiftly optimized through modeling and simulation of fuel cell processes. Verification of simulation results occurs through meaningful hardware and realistic experiments. Water management within gas diffusion electrodes and gas distribution structures can be examined and validated using micro-CT equipment. Additionally, the ZSW offers various analysis techniques (e.g., FIB-SEM) and methods developed in collaboration with the Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) for neutron and synchrotron radiography and tomography, providing temporal and spatial resolutions among the best worldwide.

Dr. Joachim Scholta
Head of Department
joachim.scholta@zsw-bw.de
+49 7319530-206

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

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



a) Messstand und b) Messapparatur zur Wärmeleitfähigkeitsmessung im unisolierten und isolierten Zustand.

a) Measuring rig and b) apparatus for thermal conductivity measurements with and without insulation.

// Sicherung der GDL-Qualität für den Markthochlauf

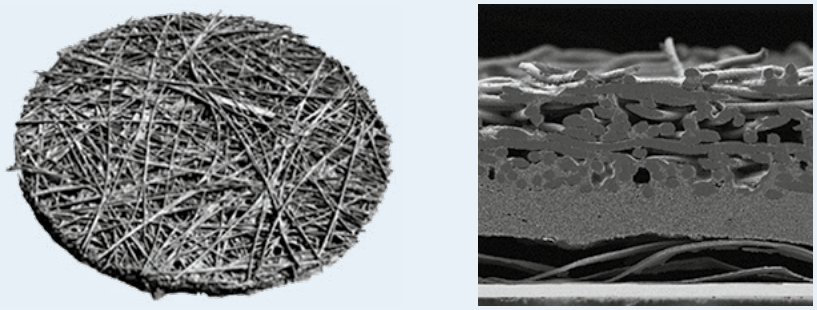
Das Ziel des vom Bundesverkehrsministerium geförderten Projektes »GDL-Qualitätssicherung für den Markthochlauf (QM-GDL)« ist die Erstellung vergleichbarer, genauer und verlässlicher Methoden zur Charakterisierung und Qualitätsbeschreibung von Gasdiffusionslagen (GDL). Am ZSW liegt der Fokus auf der Messung der Transporteigenschaften der Gasdiffusionsschicht (GDL).

Diese Eigenschaften sind stark von der Verpressung abhängig und zeigen eine ausgeprägte Raumrichtungsabhängigkeit. Die Hauptrichtungen sind dabei die Durchdringungsrichtung durch die GDL (Through-Plane; TP) und die parallele Richtung zur GDL (In-Plane; IP). Die Absolutwerte der Transportparameter, zum Beispiel Wärmeleitfähigkeit, wie obenstehend abgebildet, sollen möglichst genau bestimmt, Abhängigkeiten analysiert und Fehlerquellen identifiziert werden. Als mögliche Quelle von Messfehlern wurden die Probenvorbereitung sowie die Probenabmessungen und die Probenausrichtung identifiziert (s. Abb. a und b oben). Daneben muss die Abhängigkeit der Messwerte von den Messparametern (Temperatur, Spannung, Druck, Wärmestrom, elektrischer Strom, relative Feuchte) und von der Messzeit berücksichtigt werden.
Im Projekt konnten entsprechende Vorgehensweisen zum Nachweis und der Reduktion von Messfehlern identifiziert werden.

// GDL quality assurance for market ramp-up

The aim of the »GDL quality assurance for the market ramp-up (QM-GDL)« project sponsored by the Federal Ministry for Digital and Transport is the development of comparable, precise and and reliable methods for characterising and describing the quality of gaseous diffusion layers (GDL). At ZSW, the focus is on the measurement of the transport properties of the gas diffusion layer (GDL).

These properties are strongly dependent on the injection process and show a pronounced dependence on the spatial direction. The main directions are the direction of penetration through the GDL (through-plane; TP) and the direction parallel to the GDL (in-plane; IP). The absolute values of the transport parameters, for example, thermal conductivity, as shown above, should be determined as precisely as possible, dependencies analysed and sources of error identified. Sample preparation, sample dimensions and sample alignment were identified as possible sources of measurement errors (see fig. a and b above). In addition, the dependence of the measured values on the measurement parameters (temperature, voltage, pressure, heat flow, electric current, relative humidity) and on the measuring time must be taken into account.
It was possible in the course of the project to identify procedures for detecting and reducing measurement errors.



Draufsicht und Querschnitt einer GDL.

Top view and cross section through a GDL.

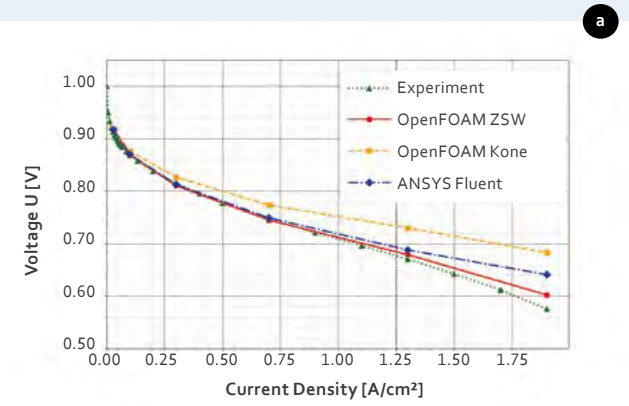
Matthias Messerschmidt
matthias.messerschmidt@zsw-bw.de
+49 731 9530-205

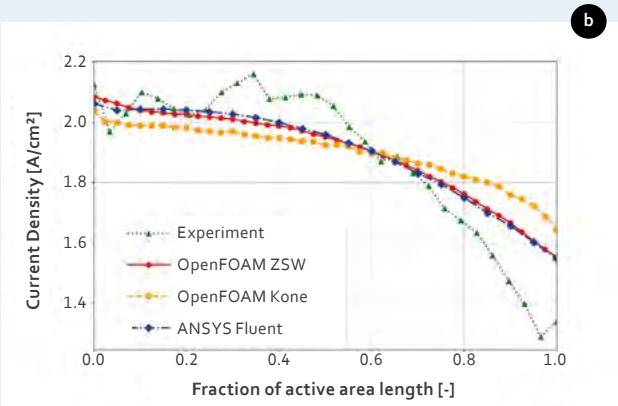
// Open-Source-CFD-Toolbox zur Strömungssimulation

Das ZSW hat im Rahmen des vom Bundesverkehrsministerium geförderten Projekts »AutoStack-Industrie« eine leistungsstarke Open-Source-Simulations-Toolbox für die numerische Strömungssimulation (CFD) von Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen entwickelt. Aufbauend auf einem bestehenden einfachen, als Open Source publizierten Modell hat die ECB-Simulationsgruppe wesentliche Erweiterungen und Verbesserungen insbesondere im Bereich der 3D-Modelle des Wärme- und Stofftransports innerhalb der Zelle sowie eine erheblich verbesserte 2D-elektrochemische Modellierung implementiert.
Die entwickelte Toolbox wurde an verschiedenen Automobil-Stack-Designs getestet, u. a. am vom ZSW entwickelten graphitischen automobilen Stack-Design, und erzielt auch im Vergleich zu kommerziellen CFD-Softwarelösungen (z. B. ANSYS Fluent) und experimentellen Daten vielversprechende Ergebnisse (s. Abb. unten). So ermöglicht sie z. B. eine realitätsnahe Simulation von Polarisationskurven und Stromdichteverteilungen.
Die ZSW-OpenFOAM-Toolbox ist auf GitHub frei verfügbar und sowohl für die wissenschaftliche Forschung als auch z .B. für die Komponentenauslegung in der Zulieferindustrie geeignet. Sie ist als ein offenes Tool gedacht, an dem Interessenten aus Wissenschaft und Industrie mitarbeiten können. Das ZSW plant eine kontinuierliche Weiterentwicklung, insbesondere im Rahmen der Aktivitäten in der Forschungsfabrik HyFaB am Standort Ulm.

// ZSW develops open-source CFD toolbox for for flow simulation

The ZSW has developed a high-performance open-source simulation toolbox for computational fluid dynamics (CFD) of low-temperature PEM fuel cells in the »AutoStack-Industrie« project which is funded by the Federal Ministry for Digital and Transport. Building on an existing simple model in an open-source publication, the ECB simulation group has introduced major extensions and enhancements, especially in 3D models for heat transfer and mass transport within the cell, and has significantly improved 2D electrochemical modelling.
The developed toolbox has been tested on various automotive stack designs, including the graphitic automotive stack design developed by ZSW, and is also achieving promising results in comparison with commercial CFD software solutions (e.g. Ansys Fluent) and experimental data (s. diagram below). It is, for example, enabling a realistic simulation of polarisation curves and current density distribution levels. The ZSW OpenFOAM toolbox is freely available on GitHub and is suitable for both scientific research and other applications, such as component design in the supply industry. It is intended to be an unrestricted tool inviting contributions from interested parties from science and industry. The ZSW has plans for continuous further development, especially as part of the work with the new HyFaB research factory at the Ulm site.





Simulationsergebnisse vs. experimentelle Daten bei 1,9 A/cm² des 300-cm² graphitischen automobilen Stack-Designs entwickelt am ZSW: a) U-I-Kennlinie und b) gemittelte Stromdichtekurve entlang des Flowfields.

Simulation results as compared with experimental data at 1.9 A/cm² of the 300-cm² graphite automotive stack design developed at the ZSW: a) U-I characteristic curve and b) average current density curve along the flow field.

OpenFOAM Toolbox auf GitHub.
OpenFOAM toolbox on GitHub.

Sabina Schneider
sabina.schneider@zsw-bw.de
+49 731 9530-218

// Industrialisierung eines Stromgenerators mit HT-PEM-Brennstoffzelle und Methanol-Reformer

Das Gesamtziel des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Vorhabens ISEHM ist die Befähigung zur marktfähigen Serienfertigung von 5-kW-Hochtemperatur (HT)-PEM-Brennstoffzellen-Stromgeneratoren mit einem integrierten Methanolreformer. Mit dem Vorhaben soll die Brücke zwischen erfolgreicher Prototypentwicklung und -fertigung zu einem wirtschaftlich tragfähigen Geschäft gebaut werden. Dazu ist es notwendig, die bestehenden Produkte sowie die Herstellverfahren unter Kosten- und Qualitätsgesichtspunkten zu optimieren.
Die Aufgaben und Ziele des ZSW im Projekt bestehen in der Modellierung des Zelldesigns und der Optimierung der Flowfield- und Portkanalgeometrien des Stacks, der Charakterisierung und dem Dauertest des entwickelten HT-PEM-Brennstoffzellenstacks sowie in der Ex-situ-Charakterisierung von Membran-Elektroden-Einheiten. Am ZSW wurde im Berichtszeitraum unter anderem ein Langzeittest an einem 30-zelligen Stack unter beschleunigten Alterungsbedingungen erfolgreich abgeschlossen. In Abbildung 1 sind die resultierenden Strom-Spannungskennlinien über die Zeit für verschiedene Betriebsbedingungen, in Abbildung 2 die entsprechenden Zeitgänge wiedergegeben. Es zeigt sich, dass auch unter stark stressenden Bedingungen mit je einem An- und Abschalten der Zelle im 2-h-Takt die Degradation über die Zeit nur sehr gering ist, so dass hinsichtlich der Katalysatoralterung eine extrapolierte Betriebsdauer im Bereich von 10.000 Stunden erwartet werden kann.

// Industrial roll-out of a power generator with HT-PEM fuel cell and methanol reformer

The overall objective of the ISEHM project, which is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, is to navigate the route to market for 5-kW HT-PEM fuel cell power generators with an integrated methanol reformer to arrive at commercial viability for series production. The project is intended to bridge the gap between successful prototype development and production through to an economically viable business. It is necessary to this end to optimise the existing products and manufacturing processes from a cost and quality perspective. The ZSW remit and targets include the modelling of the cell design and optimisation of the flow field and port channel geometries of the stack, the characterisation and endurance testing of the developed HT-PEMFC stack and the ex-situ characterisation of membrane electrode units. One achievement at the ZSW during the reporting period was the successful completion of a long-term test on a 30-cell stack under accelerated conditions. Diagram 1 shows the resulting current-voltage curves over time for various operating conditions while diagram 2 plots the corresponding time cycles. There is evidence of a sharp decrease in the degradation over time, even under highly stressful conditions with the cell being switched on and off every two hours, meaning that an extrapolated operating time in the range of 10,000 hours can be expected with regard to catalyst ageing.

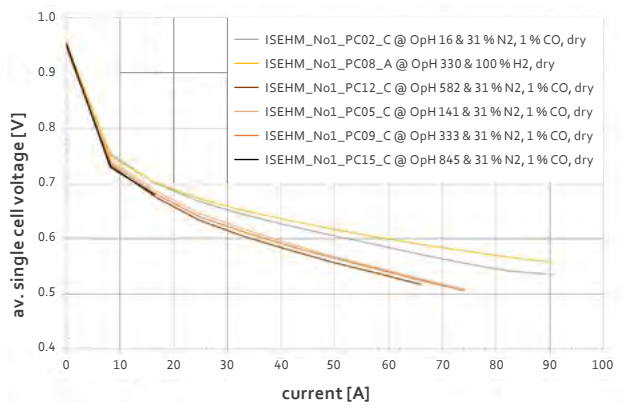


Abbildung 1: Strom-Spannungskennlinien eines 30-zelligen HT-PEMFC-Stacks bei 160 °C mit Rein-H_2 sowie mit simuliertem Reformat (30 % N_2, 1 % CO, trockene Gase), gemittelte Einzelzellspannung.
Figure 1: Current-voltage curves of a 30-cell HT-PEMFC stack at 160 °C with pure H_2 and with simulated reformate (30 % N_2, 1 % CO, dry gases), average single cell voltage.

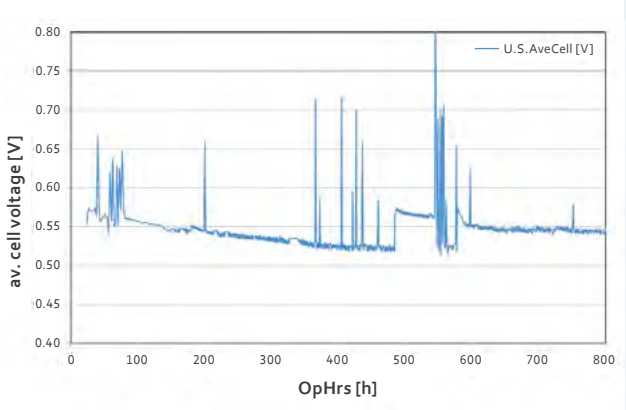


Abbildung 2: Spannungs-Zeitgangdiagramm für einen 30-zelligen HT-PEMFC-Stack mit simuliertem Reformat-Betrieb bei einem Stackstrom von 65 A.
Figure 2: Voltage-time graph for a 30-cell HT-PEMFC stack with simulated reformate operation at a stack current of 65 A.

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

// Brennstoffzellen Systeme (ECS)
// Fuel Cell Systems (ECS)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECS betreibt seit 2001 ein Brennstoffzellentestzentrum, das bis Mitte 2024 mit 40 Testständen bis 250 Kilowatt belegt sein wird. Der Fokus liegt auf der professionellen Dauererprobung von Brennstoffzellenstapeln, -systemen und -systemkomponenten. Die Tests liefern Daten zur Bewertung der Alterung, Lebensdauer und Robustheit. Die Auswertung erfolgt mittels umfangreicher Analytik und komplexer Methoden zur Fehleranalyse – auch KI-basiert. Das Testdatenarchiv umfasst mittlerweile rund 800.000 Betriebsstunden (12/2023).
In die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen und -systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen sowie für Fahrzeuge fließen jahrzehntelange Forschungsarbeit und Industrieerfahrung ein. Das Leistungsspektrum umfasst marktreife Prototypen einschließlich der Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Daneben werden Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien und Produktzertifizierungen durchgeführt. Diese erfolgen meist im Auftrag der Industrie oder über öffentlich geförderte Projekte, deren Ergebnisse der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.
Untersuchungen zum Thema Wasserstoff als Kraftstoff bilden den dritten Schwerpunkt der Arbeiten des Fachgebiets. Das Team mit seiner Erfahrung in der Brennstoffzellentechnik und der Nutzung von Wasserstoff ist durch mehrere Projekte in den Aufbau der europäischen Wasserstoffinfrastruktur eingebunden. Hierbei geht es um den Nachweis der Einhaltung internationaler Betankungsprotokolle für Wasserstofftankstellen bezüglich der Abnahme nach DIN ISO 19880 sowie um die Einhaltung der für den Brennstoffzellenbetrieb notwendigen Wasserstoffqualität gemäß ISO 14687-2.

// Our core areas of expertise

The ECS department has been operating a fuel cell test centre since 2001 which will accommodate 40 test stations of up to 250 kilowatts by the middle of 2024. The focus is on professional durability tests of fuel cell stacks, fuel cell systems and fuel cell system components. The tests provide data for the evaluation of ageing, life time and robustness. The appraisal is carried out using a wide range of analytical tools and complex methods for fault analysis, including AI-based tools and methods. Today, the test data archive contains more than 800,000 operating hours (12/2023).
Many decades of research work and industrial experience facilitate the development of fuel cell systems and components for stationary systems, on-board and emergency power supply systems and for vehicles. The range of services extends to fully fledged prototypes including control and hybridisation with batteries and DC/AC converters. Safety assessments, packaging feasibility studies and product certification processes are also carried out. These are usually performed on the instructions of industrial customers or through publicly funded projects, the results of which are available to the general public.
In-depth studies on the subject of hydrogen as a fuel form the third focus of the research work in the department. Given its experience in fuel cell technology and in the use of hydrogen, the team is involved in several projects working towards the development of the European hydrogen infrastructure. This includes the proof of compliance with international fuelling standards for hydrogen refueling stations with regard to their acceptance in accordance with DIN ISO 19880 and conformity with the hydrogen quality required for fuel cell operation pursuant to ISO 14687-2.

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

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

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

40 Brennstoffzellenteststände bis 250 KW in Betrieb.

40 fuel cell test benches up to 250 KW in operation.

// Digitalisierung und Visualisierung der Testfeldinfrastruktur

Im Zuge des Neubaus für das Brennstoffzellentestfeld von ECS in der ZSW-Forschungsfabrik HyFaB werden sukzessive alle Sensoren und Messgeräte im Gebäude in das zentrale Datenmanagement integriert. Eine daran anschließende Überwachung und Visualisierung dieser Messdaten ermöglicht eine maximale Zuverlässigkeit des Brennstoffzellentestfelds, schafft Transparenz über die einzelnen Verbraucher und zeigt Optimierungspotenziale auf.

Um den Verbrauch von Medien wie Wasserstoff, Druckluft und Stickstoff besser planen und überwachen zu können, wurde eine Datenaggregationspipeline in der Programmiersprache Python entwickelt. Diese aggregiert und archiviert Massendurchflussregler-Messungen der Prüfstände, Daten aus Steuergeräten der Kompressoren und den Tankdruck der Wasserstofftanks in einer MariaDB-Datenbank. Anschließend können die Daten, wie in untenstehender Abbildung gezeigt, mithilfe von Grafana visualisiert und ausgewertet werden.

Mithilfe dieser zentral gesammelten Daten konnten bereits Optimierungspotenziale bei der Kompressorsteuerung sowie Probleme bei der Wasserstoffbetankung identifiziert und gelöst werden, die ansonsten möglicherweise unentdeckt geblieben wären. Zudem ermöglicht der nun transparente Verbrauch eine verbesserte Planung der Belieferung des ZSW mit Wasserstoff.

Im nächsten Schritt werden die Stromzähler am Netzanschluss der Prüfstände in das Datenmanagement eingebunden, um auch hier für Transparenz zu sorgen.

// Digitisation and visualisation of the test site infrastructure

As part of the commissioning of the ECS fuel cell test field in the ZSW HyFaB research factory, all sensors and measuring devices in the building will be successively integrated into the central data management system. Subsequent monitoring and visualisation of this measurement data will then enable maximum reliability of the fuel cell test field, create transparency about the individual consumers and reveal potential for optimisation.

In order to better plan and monitor the consumption of media such as hydrogen, compressed air and nitrogen, a data aggregation pipeline was developed in the Python programming language. This aggregates and archives mass flow controller measurements from the test benches, data from control units of the compressors and the tank pressure of the hydrogen tanks in a MariaDB database. The data can then be visualised and evaluated using Grafana, as shown in the diagram below.

With the help of this centrally collected data, it has already been possible to identify and solve optimisation potential in compressor control and problems with hydrogen refuelling that might otherwise have gone undetected. In addition, the more transparent hydrogen consumption now enables improved planning of the supply of hydrogen to the ZSW. In the next step, the electricity meters at the grid connection of the test benches will be integrated into the data management system to gain insights on the electrical consumption.

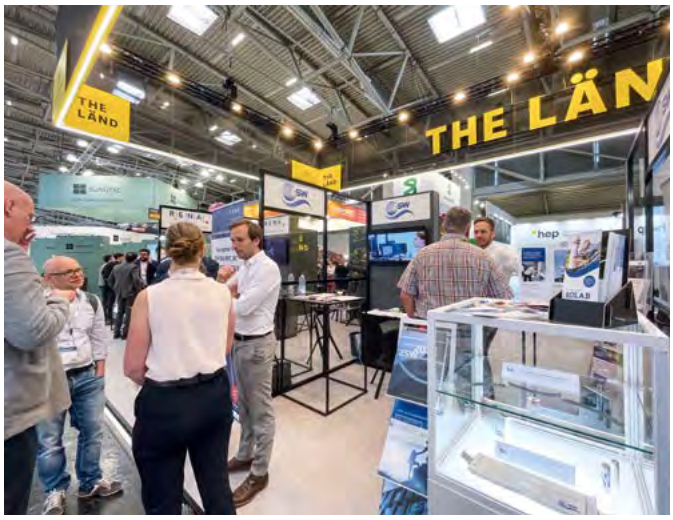
Visualisierung der Verbräuche von Wasserstoff, Druckluft und Stickstoff sowie des Wasserstofftankdrucks mithilfe von Grafana.

Visualization of hydrogen, compressed air and nitrogen consumption and the hydrogen tank pressure in Grafana.

Lukas Klass
lukas.klass@zsw-bw.de
+49 731 9530-253

PUBLIC RELATIONS

IMPRESSIONS



^
Synergieeffekte gekonnt nutzen am Gemeinschaftsstand auf der Intersolar 2023 in München – organisiert von The Länd und dem Solar Cluster BW.

^
Skilfully exploit synergy effects at the joint stand at Intersolar 2023 in Munich – organized by The Länd and Solar Cluster BW.

>
Im September fand die Eröffnungsfeier des Forschungstestfelds zur Windenergie WINSENT (»Wind Science and Engineering Test Site in Complex Terrain«) auf der Schwäbischen Alb statt.

>
The opening ceremony for the wind energy research test site WINSENT (»Wind Science and Engineering Test Site in Complex Terrain«) was held in the Swabian Alb in September.

^
Historische Stätte, historisches Photovoltaik Symposium – zum 38. Mal traf sich die Photovoltaikbranche in Bad Staffelstein.

^
Historic venue, historic PV symposium – the photovoltaic industry met for the 38th time in Bad Staffelstein.

<
Am 10. August besuchten Ministerin Dr. Hoffmeister-Kraut und Ulms OB Czisch unser ZSW-Start-Up PROTEBA GmbH. Im Fokus: Innovationen zur Batteriebrandminimierung.

<
On 10 August, Minister Dr. Hoffmeister-Kraut and Ulm's Mayor Czisch visited our ZSW start-up PROTEBA GmbH. The focus: innovations for battery fire minimization.

2023

< Reger Austausch bei einem Event zur Wasserstoff-Elektrolyse.

< Lively exchange at an event on hydrogen electrolysis.

< Batterieforschung in Ulm im Fokus: Besuch von Daniel Zadra (re.), Vorarlberger Landesrat für Energie, Umwelt und Mobilität, am 29. November.

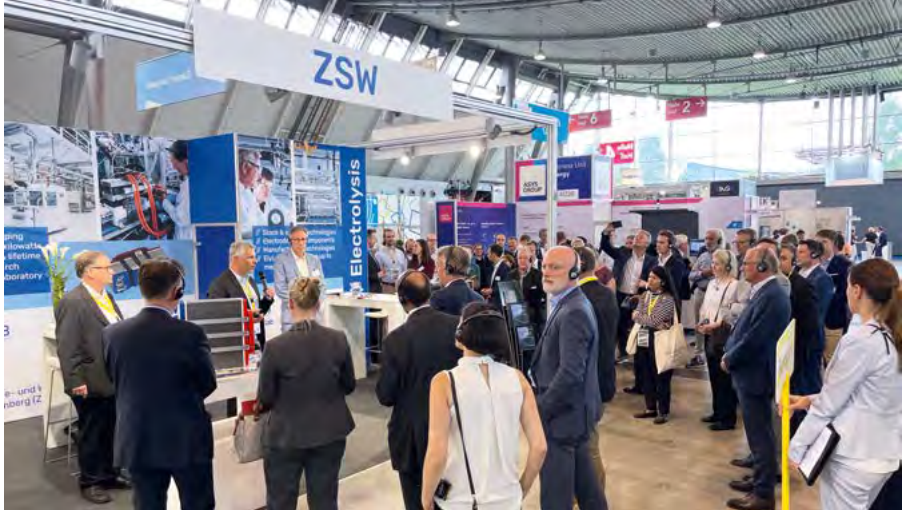
< Focus on battery research in Ulm: Visit by Daniel Zadra (right), Vorarlberg State Councillor for Energy, Environment and Mobility, on 29 November.

^ Beim 2. Perowskit-Workshop Baden-Württemberg gab es guten Grund zum Vernetzen – die neue Technologie jagt einen Rekord nach dem anderen.

^ There was plenty of opportunity for networking at the 2nd Perovskite Workshop in Baden-Württemberg. The new technology continues to set one record after another.

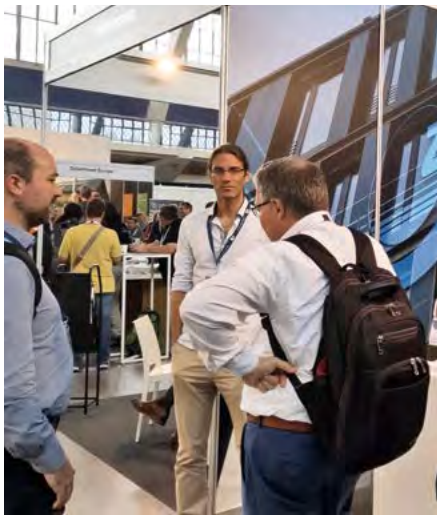
> Ministerpräsident Winfried Kretschmann besichtigte die erweiterte Batterie-Forschungsproduktionslinie in Ulm am 3. Februar.

> Minister President Winfried Kretschmann visited the expanded battery research production line in Ulm on 3 February.



>
hy-fcell 2023: ZSW Messestand in Stuttgart, 13./14. September.

>
hy-fcell 2023: ZSW Booth in Stuttgart, 13/14 September.



<
Europaweit vernetzen: Ausstellung und Konferenz bei der EU PVSEC 2023 im sonnigen Lissabon.

<
Networking across Europe: Exhibition and conference at the EU PVSEC 2023 in sunny Lisbon.

>
33 Jahre und drei Vorstände:
Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens tritt in den (Teil-)Ruhestand: v.l. Prof. Dr. Markus Hölzle, Prof. Dr. Jürgen Garche, Prof. Dr. Werner Tillmetz.

>
33 years and three board members:
Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens is taking (partial) retirement: f. l. Prof. Dr. Markus Hölzle, Prof. Dr. Jürgen Garche, Prof. Dr. Werner Tillmetz.

^
Behind the Scenes beim Filmdreh von Zeiss Microscopy: Gruppenleiterin Theresa Magorian Friedlmeier wurde hier bei ihrer material-wissenschaftlichen Analyse filmisch begleitet.

^
Behind the scenes at the Zeiss Microscopy film shoot: Group leader Theresa Magorian Friedlmeier was filmed here during her materials science analysis.

>
100 Ingenieure erkundeten während des VDI Trend Forums 2023 am ZSW in Ulm die HyFaB-Forschungsfabrik für Brennstoffzellen.

>
During the VDI Trend Forum 2023 at ZSW in Ulm, 100 engineers explored the HyFaB research facility for fuel cells.

^
Multimedial in Szene gesetzt – Herr Powalla, Vorstandsmitglied und Geschäftsbereichleiter Photovoltaik, beim »Smarter E Podcast: Diese Innovationen treiben die Elektromobilität und Solarbranche«.

^
Multimedia presentation – Mr. Powalla, Member of the Executive Board and Head of the Photovoltaics division, at the »Smarter E Podcast«.

< ZSW Stand auf der Hannover Messe 17.-21. April.

< ZSW booth at the Hannover Fair Industry 17-21 April.

v ZSW Boot beim »Nabada« – ein traditionelles Fest, das jedes Jahr in Ulm stattfindet und mit einer großen Flussparade auf der Donau verbunden ist.

v ZSW's boat at the »Nabada«. This is a traditional festival that takes place every year in Ulm and is combined with a large river parade on the Danube.

^ Der Bund-Länder-Ausschuss Forschung & Innovation besuchte die ZSW-Labore in Stuttgart.

^ The Bund-Länder committee visited the ZSW laboratories in Stuttgart.

< Workshop zum »Leitstern Energie-Effizienz« am ZSW.

< Workshop for the competition »Leitstern Energie-Effizienz« at ZSW.

< Das ZSW veranstaltete die 3. IZABW-Konferenz zu Zink-Luft-Systemen mit 100 Experten in Ulm.

< The ZSW organized the 3rd IZABW conference on zinc-air systems with 100 experts in Ulm.

// Sichtbarkeit
// Visibility

// Mitgliedschaften
// Memberships

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
AKK	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
Allianz BIPV	Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V.
BVES	Bundesverband Energiespeicher Systeme e. V.
Cluster BZ BW	Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg
CPN	Clean Power Net
DFBEW	Deutsch-französisches Büro für die Energiewende
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DIN	DIN-Arbeitsausschuss Wasserstofftechnologien
DPP	Deutsche Phosphor-Plattform e. V.
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V.
ECS	Electrochemical Society
EERA	European Energy Research Alliance
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.
ESPP	European Sustainable Phosphorus Platform
EUREC	The Association of European Renewable Energy Research Centers
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
Hy-Five	Modellregion Grüner Wasserstoff e. V.
Hydrogen Europe	Hydrogen Europe Research
innBW	Innovationsallianz Baden-Württemberg
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V.
OpenEMS	OpenEMS Association e. V.
PEE Plattform	Erneuerbare Energien Baden-Württemberg e. V.
performing energy	Fachkommission des DWV e. V. Power-to-Fuel
Plattform P-Rück	DWA-Landesverband Baden-Württemberg
SmartGridsBW	SmartGrids-Plattform Baden-Württemberg e. V.
SolarCluster	Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
SolarPower	SolarPower Europe
STRise	Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy
UNW	Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e. V.
VDMA	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süddeutschland

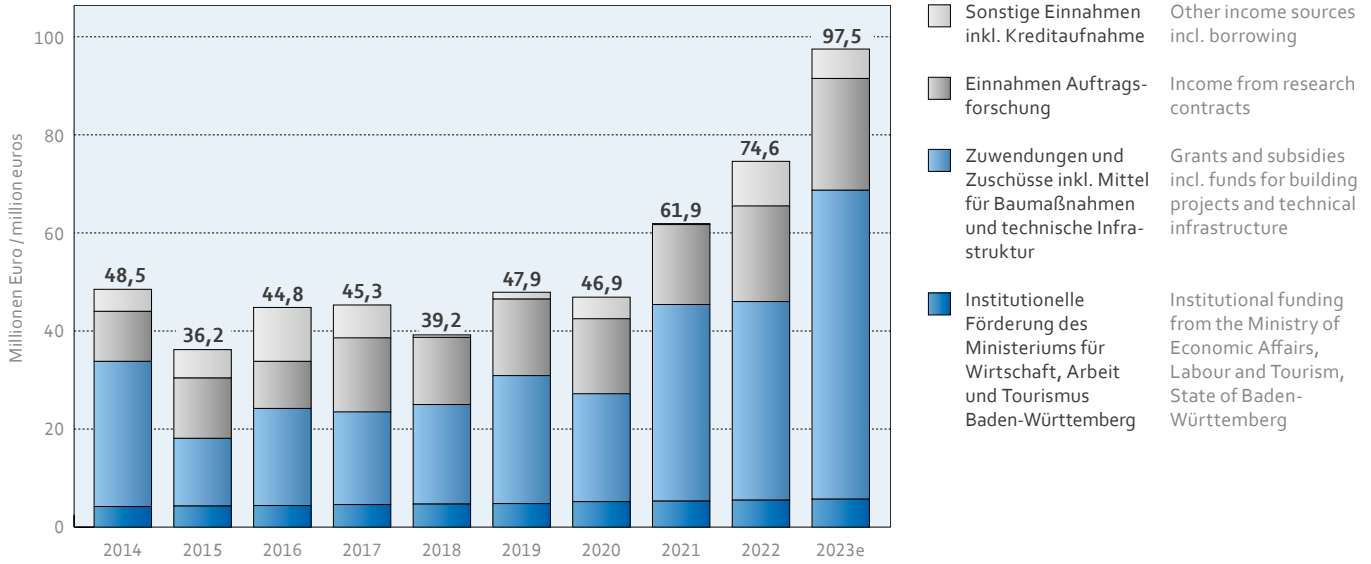
DOCUMENTATION

// Finanzbericht
// Financial Information

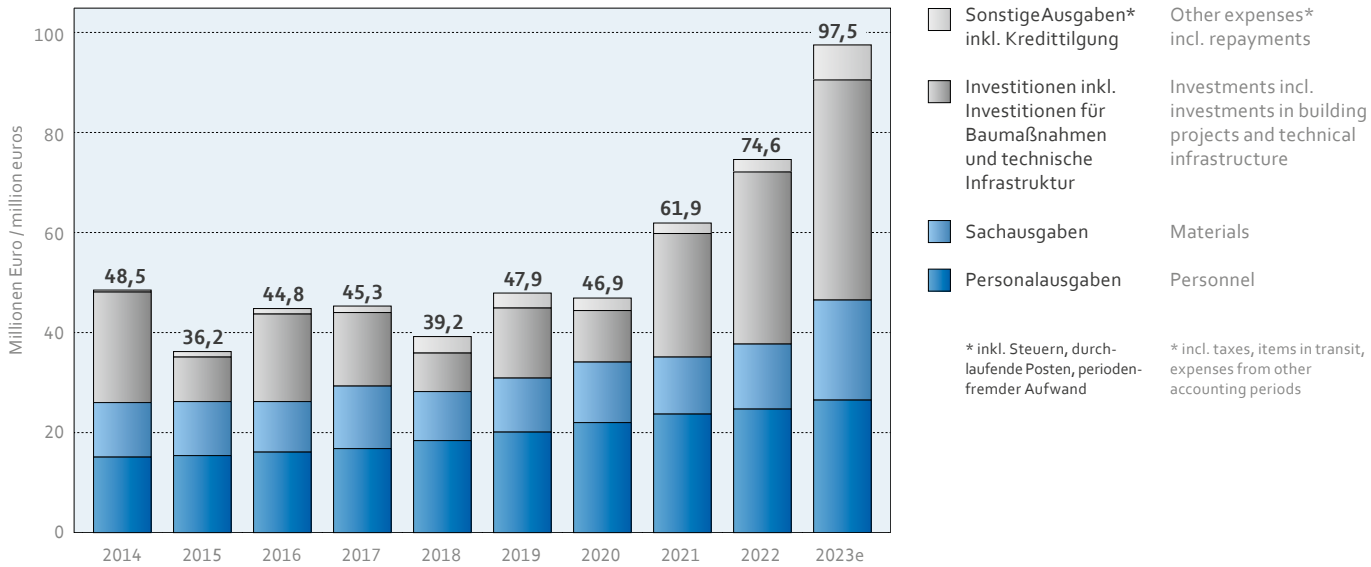
Das Einnahmevolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 97,5 Mio. Euro und damit über dem Niveau von 2022, weil im Berichtsjahr überdurchschnittlich hohe Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen in den Themenfeldern Brennstoffzellen und Batterien zugegangen sind. Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2023 um 0,2 Mio. auf 5,7 Mio. Euro.

The revenue from ordinary business activities in the past year amounted to 97.5 million euro, higher than in 2022 due to above-average investment funding for the fuel cell and battery departments in the year under review.
The proportion of institutional funding from the state of Baden-Württemberg increased by 0.2 million euro to 5.7 million euro in 2023.

Finanzierungsstruktur des ZSW / Financial structure of the ZSW



Ausgabenentwicklung des ZSW / Development of expenditures at ZSW

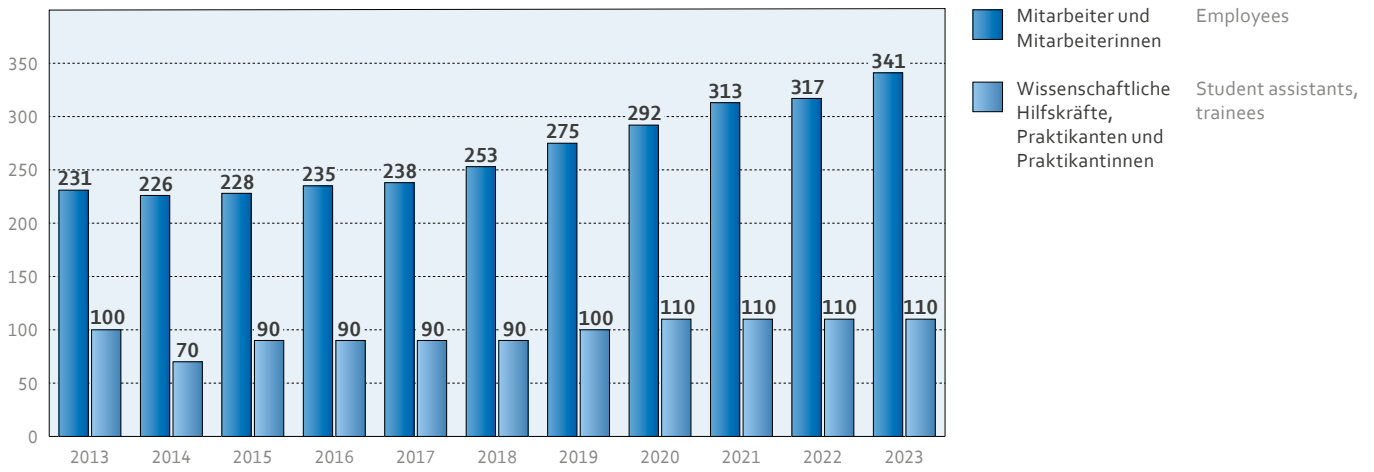


// Personalentwicklung
// People Development

Das ZSW ist mit seinen Zukunftsthemen, seinen Arbeitsbedingungen, dem kollegialen Betriebsklima sowie den vielfältigen Entwicklungsperspektiven für seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ein attraktiver Arbeitgeber.
Die Mitarbeiterkapazität hat sich im Jahr 2023 gegenüber dem Vorjahr von 290 Vollzeitstellen auf 310 erhöht. Das entspricht einer Beschäftigtenzahl von 341. Mit einem Anteil von 86 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität liegt die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau.
Das ZSW ist auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland attraktiv. So haben gut 12 % aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft. Die Kolleginnen und Kollegen kommen aus 25 verschiedenen Ländern.
Der Frauenanteil lag bei 23 %. Das ZSW strebt an, diesen für technisch orientierte Forschungsinstitute typischen Anteil zu erhöhen, indem es möglichst flexibel ausgestaltete Arbeitszeitmodelle anbietet, die die Vereinbarkeit von Beruf und Familie erleichtern.
Das ZSW bietet seinen Beschäftigten ein breites Spektrum an Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen. Es umfasst fachspezifische und fachübergreifende Inhalte ebenso wie Angebote zur Persönlichkeitsentwicklung und Schulungen für Führungskräfte. Darüber hinaus stehen im Rahmen des beruflichen Gesundheitsmanagements Veranstaltungen zum Thema Bewegung, Stressprävention und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm.
Einen hohen Stellenwert nehmen die Vernetzung des ZSW mit Hochschulen, die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten ein. Daher waren 2023 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 110 Studierende sowie Praktikantinnen und Praktikanten am ZSW tätig. Im Berichtsjahr arbeiteten 38 Doktorandinnen und Doktoranden an ihrer Dissertation.

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 2023, rising to 310 from 290 in the previous year. The number of people employed is 341. With research and scientific staff accounting for 86 % of the total, productivity remains steady and at a high level.
The ZSW also attracts academics from abroad. About 12 % of the employees have foreign citizenship, for example, with colleagues coming from 25 different countries.
The proportion of women was 23 %. 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 make it easier to combine career and family.
The ZSW 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 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.
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 2023 in addition to the staff employed under the salary scheme for state employees (Tarifvertrag der Länder – TV-L). In the year under review, 38 postgraduate students were working on their doctorates.

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



// Organisationsstruktur
// Organisational Structure

Kuratorium / Board of Trustees
Vorsitz / Chairman

Prof. Dr. Christian Mohrdieck

Vorstand / Board

Prof. Dr. Frithjof Staiß (CEO)
Prof. Dr. Markus Hölzle
Prof. Dr. Michael Powalla

Zentralbereich Finanzen, IT, Personal & Recht
Central Division Finance, IT, HR and Legal Affairs

Prof. Dr. Frithjof Staiß

Qualitätsmanagement
Quality Management

Uwe Klinger

Öffentlichkeitsarbeit
Public Relations

Tiziana Bosa
Julia Fromm
Dennis Reitenbach

ZSW Technologietransfer und Service GmbH

Prof. Dr. Frithjof Staiß

GESCHÄFTSBEREICH PHOTOVOLTAIK
Photovoltaics Division

Prof. Dr. Michael Powalla

ENERGIEPOLITIK UND ENERGIETRÄGER
Energy Policy and Energy Carriers

Prof. Dr. Frithjof Staiß

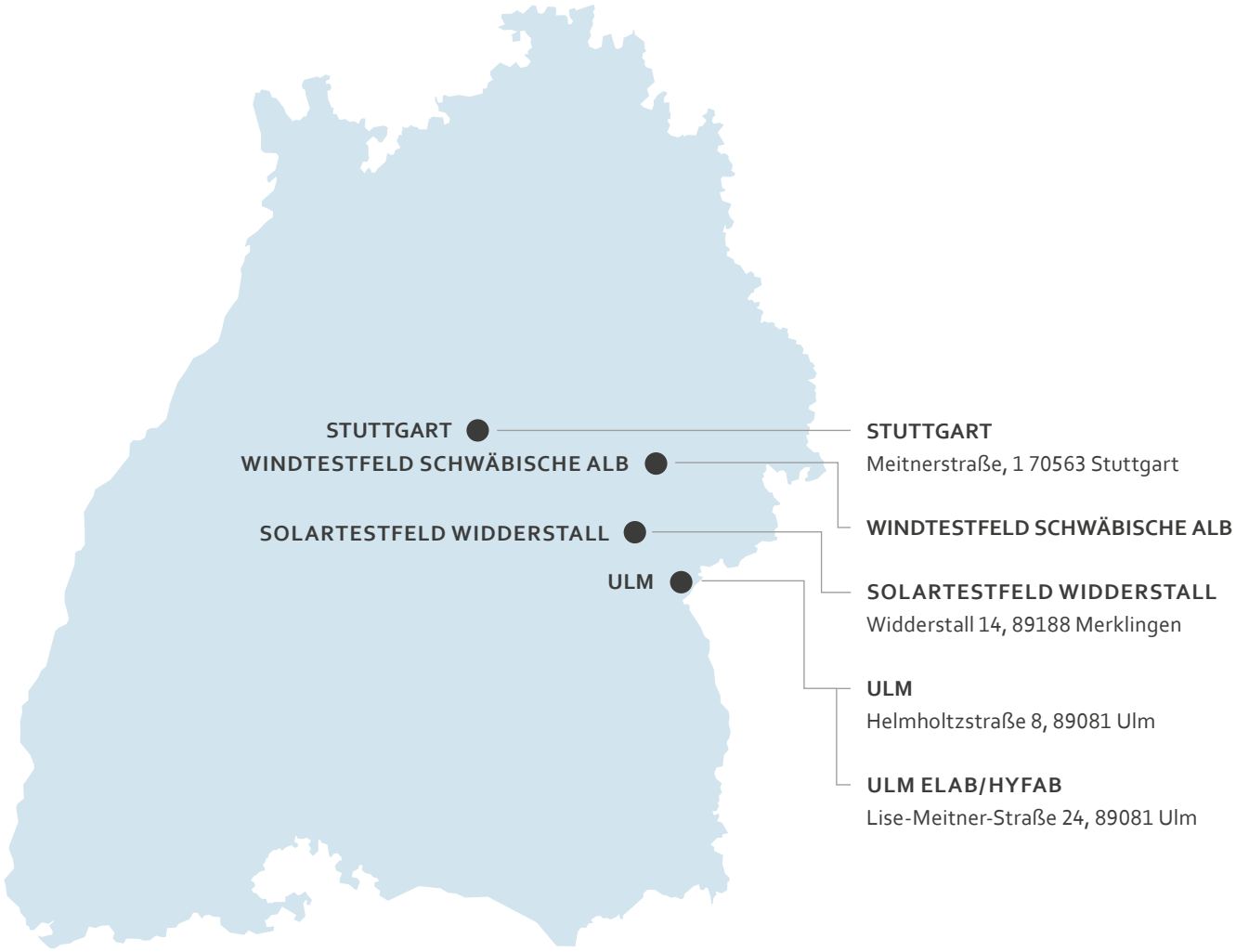
GESCHÄFTSBEREICH ELEKTROCHEMISCHE ENERGIETECHNOLOGIEN
Electrochemical Energy Technologies Division

Prof. Dr. Markus Hölzle

Weitere Organigramme auf unserer Website:

Further organisation charts on our website:

// Standorte
// Locations



ANSPRECHPARTNER STUTTGART / CONTACT

Julia Fromm
Phone: +49 711 7870-278
E-mail: julia.fromm@zsw-bw.de

Dennis Reitenbach
Phone: +49 711 7870-393
E-mail: dennis.reitenbach@zsw-bw.de

ANSPRECHPARTNERIN ULM / CONTACT

Tiziana Bosa
Phone: +49 731 9530-601
E-mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de

// Bildnachweis
// Picture credits

Umschlag außen und innen:
David Arzt

S. 4 Alexander Fischer
S. 10-12 Martin Duckek
S. 13 Martin Duckek (oben), David Arzt (unten)
S. 14 ZSW (unten links)
S. 16-29 David Arzt
S. 30-31 Alexander Fischer
S. 37 Alexander Fischer
S. 38 Adobe Stock
S. 45 Abwasserzweckverband Staufener Bucht, Urheber Harald Neumann (oben), David Arzt (unten)
S. 46 Stadtwerke Stuttgart GmbH (oben), David Arzt (unten)
S. 47 Götsch Media GmbH & Co. KG (oben), Alexander Fischer (unten)
S. 52 Alexander Fischer
S. 53 Martin Duckek (oben)
S. 56 Alexander Fischer
S. 58 Alexander Fischer
S. 62 Alexander Fischer
S. 66 Alexander Fischer
S. 67 Elvira Eberhardt (oben)
S. 68-69 Jens Willebrand Photographie
S. 70 David Arzt (oben rechts)
S. 71 David Arzt (oben), Martin Duckek (unten)
S. 74 tikka design GbR (Icons)
S. 76-77 Jens Willebrand Photographie

Wo nicht anders angegeben: ZSW

// Impressum
// Imprint

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

REDAKTION // EDITORIAL TEAM
Petra Nikolić und Julia Fromm
(verantwortlich / chief editor)
Tiziana Bosa
Gudrun Scherg

ÜBERSETZUNGEN // TRANSLATION
Elisabeth Noske
Gillian Christine Gingell

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

DRUCK // PRINT
printmedia solutions GmbH
Weinheimer Straße 62
68309 Mannheim

Der Jahresbericht wurde klimaneutral mit Cradle to Cradle-, Blauer Engel- und FSC-Zertifizierung sowie mit Farben auf Pflanzenölbasis nach DIN ISO 12647-2 gedruckt.
The Annual Report complies with the requirements for Cradle to Cradle, Blue Angel and FSC certification and has been printed with vegetable oil-based inks in accordance with the environmental standards set out in DIN ISO 12647-2.

www.zsw-bw.de

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

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

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