
// Ergebnisse
Results

2020

ZSW

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / Our Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	Erfolge 2020 / Achievements in 2020
14	Schwerpunktbericht / Focus Report
	Batterien: Vom Material zum Produkt und wieder zurück
	Batteries: from the material to the product and back again
34	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
36	Systemanalyse / Systems Analysis
40	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
44	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
48	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
52	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
56	Produktionsforschung / Production Research
58	Akkumulatoren / Accumulators
60	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
64	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
68	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
70	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
78	Dokumentation / Documentation
80	Finanzielle Entwicklung / Financial Development
82	Personalentwicklung / Staff Development
84	Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
88	Organigramme / Organisational Charts
90	Standorte / Locations
92	Abkürzungen / Abbreviations
93	Impressum / Legal notice

// Copyright

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

// Copyright

The copyright is held by the publisher. Publications and the use of excerpts are not permitted without the express permission of the publisher. Any contraventions will result in legal action.

// Vorwort

Das Jahr 2020 war für das ZSW in doppelter Hinsicht außergewöhnlich. Wie alle mussten wir die Herausforderungen der Coronapandemie bewältigen. Von der breiten Öffentlichkeit aber fast unbemerkt, vollzieht sich in den Themenfeldern des ZSW ein Paradigmenwechsel: Weltweit folgen inzwischen mehrere Dutzend Staaten und Regionen sowie eine schnell wachsende Anzahl von Unternehmen dem Leitbild der Klimaneutralität möglichst vor 2050 – auch weil damit erhebliche wirtschaftliche Chancen verbunden werden. Dadurch entsteht mit Vehemenz etwas Neues: ein politisch *und* ökonomisch getriebener Innovationswettbewerb für Nachhaltigkeit!

Die im Sommer 2020 auf europäischer und deutscher Ebene verabschiedeten Wasserstoffstrategien spiegeln sich in einem hohen Interesse der Wirtschaft an der Zusammenarbeit mit dem ZSW in den Bereichen Elektrolyse, synthetische Kraftstoffe und Brennstoffzellen. Parallel wächst die Nachfrage nach unserem Batterie-Know-how für die Elektromobilität, dem der diesjährige Schwerpunktbericht: „Batterien: Vom Material zum Produkt und wieder zurück“ gewidmet ist. Hier geht es um technisch-wirtschaftliche Fortschritte, aber auch um ökologische Nachhaltigkeit: die Substitution kritischer Materialien und das anstehende Mega-Thema Elektroden-Recycling.

Der Jahresbericht präsentiert darüber hinaus weitere Highlights des ZSW: von bleifreien Perowskit-Solarzellen bis zur gebäudeintegrierten Photovoltaik, von der Naturschutzforschung auf unserem Wind-Testfeld bis zur Gewinnung von CO₂ aus Luft, vom Einsatz künstlicher Intelligenz zur Optimierung von Prozessen bis zu strategischen Systemanalysen.

Wir freuen uns über das anhaltend hohe Interesse an unseren Arbeiten, das wir in vielen Gesprächen und einer erfreulich intensiven Berichterstattung in den Medien erfahren. Dies ist das Verdienst aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, für deren großartigen Einsatz sich der Vorstand zuallererst bedanken möchte. Besonderer Dank gilt auch den Mitgliedern des Kuratoriums und dessen Vorsitzendem, Prof. Christian Mohrdieck. Dem Land Baden-Württemberg danken wir für die finanzielle Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit ebenso wie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

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

// Foreword

2020 was a doubly unusual year for ZSW. Just like everyone else, we had to deal with the challenges presented by the coronavirus pandemic. Almost unnoticed by the general public, however, a paradigm shift is taking place in ZSW's focus areas: worldwide, several dozen states and regions as well as a rapidly growing number of companies are now embracing the guiding principle of climate neutrality before 2050 wherever possible – not least because there are considerable economic opportunities involved. This shift is dynamically driving an entirely new phenomenon: competitive innovation for sustainability which is politically *and* economically motivated!

The hydrogen strategies adopted at the European and German levels in the summer of 2020 are mirrored by the keen interest on the part of industry in cooperating with ZSW in the areas of electrolysis, synthetic fuels and fuel cells. In parallel, there is a growing demand for our battery expertise for the purpose of electromobility, which this year's Focus Report is about: "Batteries: from the material to the product and back again". This report covers technological and economic progress, but also ecological sustainability: substituting critical materials and the upcoming mega-topic of electrode recycling.

This annual report also presents some other ZSW highlights: from lead-free perovskite solar cells to building-integrated photovoltaics, from conservation research on our wind test site to extracting CO₂ from the air and from the use of artificial intelligence to optimise processes to strategic system analyses.

We are delighted about the continuing high level of interest in our work which we were able to experience in many discussions and through pleasantly extensive coverage in the media. This is the achievement of all our employees, and the Board would first and foremost like to thank them for their outstanding commitment. Special thanks also go to the members of the Board of Trustees and its Chairman, Professor Christian Mohrdieck. We would also like to thank the Federal State of Baden-Württemberg for its financial support and excellent cooperation as well as our partners from companies, public research funding and science.

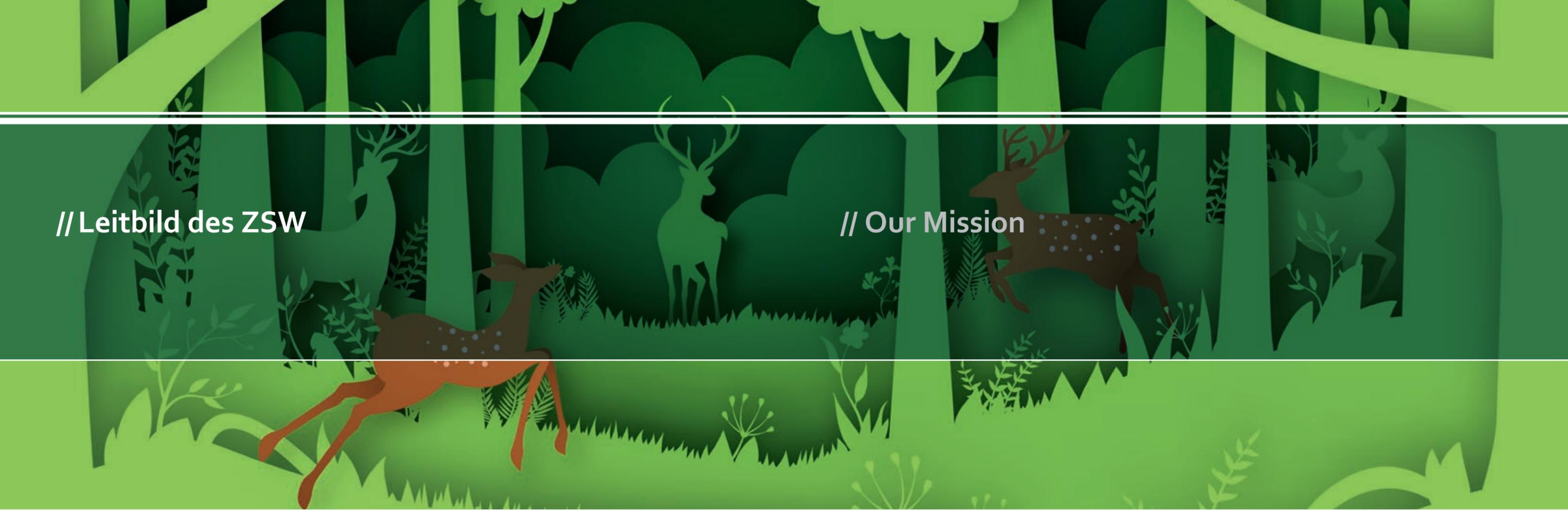
We hope you enjoy reading the ZSW Annual Report!



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Michael Powalla

// Prof. Dr. Markus Hölzle



// Leitbild des ZSW

// Energie mit Zukunft

Ohne Energie kein Wohlstand, ohne Energie keine Entwicklung. Energie ist Treiber für Innovation und selbst Gegenstand von Innovation. Ökonomisch, ökologisch und gesellschaftlich tragfähige Energiekonzepte sind untrennbar mit der Nutzung erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energieeffizienz verbunden. Dafür arbeitet das ZSW: Wir erforschen und entwickeln Photovoltaik, regenerative Energieträger (wie Wasserstoff und Methan als Erdgasersatz), Batterie- und Brennstoffzellentechnologien und erstellen ökonomische Analysen von Energiesystemen.

// Wissenschaft mit klarem Fokus

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

// Technologietransfer schafft Arbeitsplätze

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

// Qualität für unsere Kunden

Die Zufriedenheit unserer Kunden hat oberste Priorität. Als unabhängiges Institut reagieren wir schnell und flexibel. Die Qualität unserer Leistungen, Budget- und Termintreue sowie der Umgang mit 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.

// Our Mission

// Energy is our future

Energy is crucial for prosperity and development. It drives innovation and is itself the subject of innovation. Renewable energy and increased energy efficiency are an intrinsic part of all economically, ecologically and socially sustainable energy concepts for the future. Our research and development covers photovoltaics, renewable energy carriers (such as hydrogen and methane gas as natural gas substitutes) and battery and fuel cell technologies; our analyses cover the economics of energy systems.

// Science is our power

We are among the leading research institutions in our respective fields, which puts us in a position to develop a range of related technologies and successfully implement them within the market place. Linking the disciplines of science, engineering and economics is the core of ZSW's competence.

// 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 chain, from materials research, prototype development and production processes to application systems, quality tests and market analyses. This range of expertise from a single source is the key to success for our partners in the business world.

// Quality is our watchword

Customer satisfaction is our top priority. As an independent institute, we are able to respond to our customers' requirements quickly and flexibly. We take pride in the quality of our services, our adherence to budget stipulations and deadlines and our commitment to confidential information. Our high standards owe much to our certified quality management.

// Teamwork is our bond

Our strength is founded on the motivation of our highly qualified and professional employees. Active recognition of each individual, collegial interaction and transparent decision-making processes are central to all our activities.

// The environment is our concern

The management and employees of ZSW are committed to sustainable development. The protection of natural resources, social consensus and economic viability are the criteria on which our technology is based.

// Knowledge is our force

The issues we tackle are complicated. We deliver transparent, neutral information to the economic, political and social arenas. Our goal is to facilitate understanding and evaluation of new technologies and thus to win support for their implementation and help shape the energy supply of the future.

// Stiftung

// Foundation

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

Stiftungsauftrag:

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

Stifter des ZSW / The founders are

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

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

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

The goal of the foundation is:

“...to conduct and promote research and development in the field of renewable energies, energy efficiency, energy conversion and storage, with a focus on solar energy and hydrogen technology, in cooperation with university and non-university research and by transferring the results into industrial application.”

Unternehmen / Commercial enterprises

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

// Mitglieder des Kuratoriums

// Members of the Board of Trustees

seit Juni 2020 / since June 2020

Vorsitzender / Chairman

- > Prof. Dr. Christian Mohrdieck

Stellvertreter / Vice Chairmen

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

Ministerien und Organisationen / Ministries and Organizations

- > Ministerialdirigent Ulrich Benterbusch, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- > Ministerialdirigent Engelbert Beyer, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- > Dr.-Ing. Klaus Bonhoff, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
- > Dr.-Ing. Ronny Feuer, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Karl Greißing, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg

Universitäten / Universities

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

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / German Aerospace Research Centre

- > Dipl.-Ing. Bernhard Milow, Programmdirektor Energie

Fraunhofer-Gesellschaft

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

Wissenschaft / Science

- > Prof. Dr. Michael Auer, Steinbeis Stiftung für Wirtschaftsförderung
- > Dr. Marion Dreyer, DIALOGIK Gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH
- > Prof. Dr.-Ing. Manfred Fischechick, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- > Prof. Dr. Angelika Heinzel, Universität Duisburg-Essen
- > Prof. Dr. Jürgen Janek, Justus-Liebig-Universität Gießen
- > Prof. Dr. Uli Lemmer, Karlsruher Institut für Technologie
- > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Wirtschaft / Commercial enterprises

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

//Erfolge 2020

// Achievements in 2020



// Erfolge 2020

// Achievements in 2020



// Die International Battery Materials Association (IBA) zeichnete Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens aus.
// The International Battery Materials Association (IBA) honoured Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens.

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

Auch 2020 wurden wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

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

In 2020, excellent results were once again achieved in the key areas.

// HERSTELLUNG VON GROSSEN LITHIUM-IONEN-ZELLEN IN NEUEN BAUARTEN

Batterien sind eine Schlüsseltechnologie für die stark wachsende Zahl der Elektrofahrzeuge und spielen für die Wertschöpfung eine wichtige Rolle. Derzeit findet die Fertigung hauptsächlich in Asien und Nordamerika statt. Mit dem Projekt ZellkoBatt soll sich das ändern: In dem im März 2020 gestarteten Vorhaben wollen ZSW-WissenschaftlerInnen großformatige Lithium-Ionen-Zellen in den für automobile Anwendungen relevanten Bauarten optimieren und gleichzeitig die Kosten von Komponenten und Fertigungsprozessen senken. Die Ergebnisse werden auf die bereits seit dem Jahr 2014 betriebene, seriennahe ZSW-Forschungsproduktionslinie übertragen und auf einen massentauglichen Maßstab gebracht. Das Bundesforschungsministerium fördert das Vorhaben mit insgesamt 12,7 Millionen Euro.

// MANUFACTURING LARGE-SCALE LITHIUM-ION CELLS WITH NEW DESIGNS

Batteries are a key technology for the rapidly rising number of electric vehicles and they play an important role in value creation. Most of them are currently being manufactured in Asia and North America. The ZellkoBatt project aims to change this: as part of the project, which started in March 2020, ZSW researchers are seeking to optimise the large format lithium-ion cell types relevant for automotive applications and at the same time reduce component and manufacturing process costs. The results will be transferred to the near-series ZSW research production line, which has already been in operation since 2014 and then brought to a scale suitable for mass production. The German Federal Ministry of Education and Research is funding the project with 12.7 million euros.



// Automatisierte Fertigungsprozesse für Batteriezellen in der Forschungsproduktionslinie des ZSW (FPL).
// Automated manufacturing processes for battery cells in the ZSW research production line (FPL).

// INTERNATIONALER BATTERIEPREIS FÜR DR. MARGRET WOHLFAHRT-MEHRENS

2020 erhielt Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens (Leitung Batterien) den „IBA Technology Award“ für herausragende Beiträge in der angewandten, industrienahen Forschung und Entwicklung von Batterien. Die Chemikerin habe mit ihrer Arbeit zur Weiterentwicklung der Batterietechnologie in den vergangenen Jahrzehnten maßgeblich beigetragen. Der Preis wurde online im Rahmen eines Sondersymposiums der IBA verliehen. Die „International Battery Materials Association“ (IBA) ist die bedeutendste Vereinigung der BatterieforscherInnen weltweit. Die Träger des IBA-Preises gehören zur ersten Liga der BatterieforscherInnen. So erhielten die Chemie-Nobelpreisträger Whittingham, Goodenough und Yoshino die „IBA Medal of Excellence“, mit dieser Preiskategorie würdigt die IBA Personen für ihre außergewöhnlichen und lebenslangen Beiträge für die Entwicklung der Lithium-Ionen-Technologie.

// KOSTENGÜNSTIGE IMPEDANZMESSUNG FÜR BRENNSTOFFZELLEN ENTWICKELT

Das ZSW in Ulm hat 2020 eine Anlage entwickelt, mit der kostengünstig und testbegleitend Impedanzmessungen an Brennstoffzellen durchgeführt werden können. Die Anlage ist vollständig in die Teststandsumgebung integriert und funktioniert mit marktgängigen Standardkomponenten. Gegenüber kommerziellen Impedanzmessanlagen ist die Anlage dadurch universell einsetzbar und es können bei wesentlich geringeren Kosten Brennstoffzellen-Einzelzellen und -Vollzell-Stacks vermessen werden. Die Anlage führt darüber hinaus Online-Regressionen durch und speichert für jeden Messpunkt die Parameter für ein vordefiniertes Ersatzschaltbild automatisch ab. Dieser Erfolg basiert auf dem tiefen Verständnis durch interdisziplinäre Teams zur Stack-Technologie, zu Brennstoffzellentests und zur Elektronik.

// INTERNATIONAL BATTERY AWARD FOR DR. MARGRET WOHLFAHRT-MEHRENS

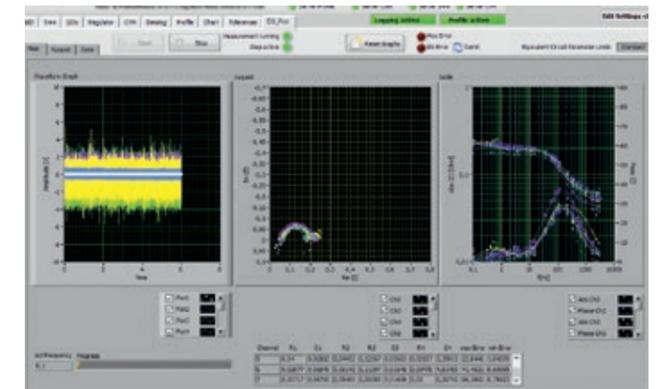
In 2020, Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens (Head of Accumulators Materials Research) received the “IBA Technology Award” for distinguished achievements in applied, industry-related research on battery development. With her work as a chemist, she has made a significant contribution to the advancement of battery technology over the past decades. The prize was awarded online during an IBA symposium. The “International Battery Materials Association” (IBA) is the most prestigious association of battery researchers worldwide. Recipients of the IBA prize rank among the world’s finest battery researchers. Award winners included the Nobel Prize laureates for chemistry Whittingham, Goodenough and Yoshino who are recipients of the “IBA Medal of Excellence”. With this award category, IBA recognises individuals for their extraordinary and lifelong contributions to the advancement of lithium-ion technology.

// COST-EFFECTIVE IMPEDANCE MEASUREMENT DEVELOPED FOR FUEL CELLS

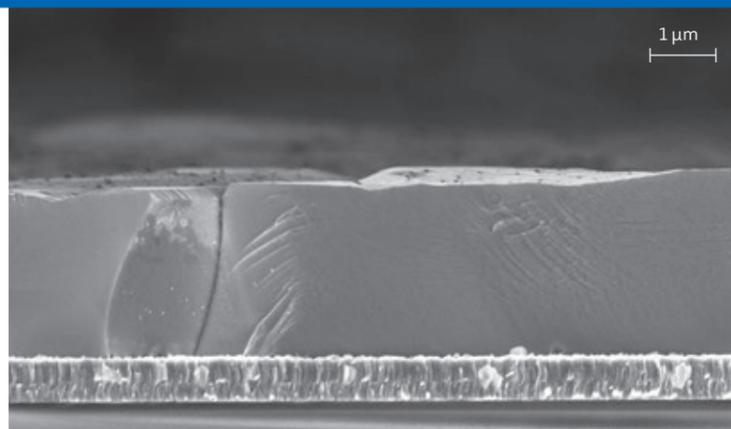
In 2020, ZSW in Ulm developed a system for conducting cost-effective impedance measurements during testing of fuel cells. The system is fully integrated into the test rig environment and works with standard components available on the market. Compared to commercial impedance measuring systems, the system can be used universally and can measure both single cells and stacked fuel cells at considerably lower costs. The system also carries out online regressions and automatically saves the parameters for a predefined equivalent circuit diagram for each measuring point. Its success is based on a deep understanding gained by interdisciplinary teams on stack technology, fuel cell testing and electronics.



// IBA Technology Award für Errungenschaften zu Materialien und Prozessen für Lithium-Ionen-Batterien.
// IBA Technology Award for accomplishments related to materials and processes for lithium-ion batteries.



// Das ZSW hat eine Anlage entwickelt, mit der kostengünstig Impedanzmessungen an Brennstoffzellen durchgeführt werden können.
// ZSW has developed a system for cost-effective impedance measurements on fuel cells.



// ACIGS-Probe mit großen Körnern und flacher Oberfläche (Aufnahme aus dem Rasterelektronenmikroskop).
 // ACIGS sample with large grains and a smooth surface (image taken with a scanning electron microscope).



// BESSERE ZELLEN DURCH GLATTERE SCHICHTEN

Für die Weiterentwicklung der CIGS-Dünnschichtsolarzellen wird bei der Herstellung des Absorbermaterials ein Teil der Kupferatome (Cu) durch Silberatome (Ag) ersetzt. Dies hat zum Ziel, die Qualität des Absorbers zu verbessern und höhere Wirkungsgrade für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie zu erreichen. Am ZSW wird deshalb der Einfluss verschiedener Beschichtungsparameter (z. B. Temperatur, Ag-Anteil) auf die Komposition, Topographie und elektrooptischen Eigenschaften der ACIGS-Absorberschicht genau analysiert und ein tieferes Verständnis hinsichtlich der optimalen Prozessführung generiert. Bereits kleinste Mengen an Silber verringern die Oberflächenrauigkeit der ACIGS-Solarzelle, was auch ihre Integration in Mehrfachsolarzellen erleichtert. Diese Erkenntnis wird in dem seit Juni 2019 vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt CAPITANO genutzt, um verbesserte Perowskit/ACIGS-Tandemsolarzellen zu realisieren.

// BETTER CELLS THANKS TO SMOOTHER LAYERS

Some of the copper atoms (Cu) are being replaced by silver atoms (Ag) in the production of the absorber material in order to further refine CIGS thin-film solar cells. The goal is to improve the quality of the absorber and achieve higher efficiencies when converting sunlight into electrical energy. This is why the influence of different coating parameters such as temperature and Ag content on the composition, topography and electro-optical properties of the ACIGS absorber layer is being analysed in detail at ZSW, and a deeper understanding is being sought with regard to optimal process control. Even the smallest amounts of silver reduce the surface roughness of the ACIGS solar cell, also making it easier to integrate into multi-junction solar cells. This knowledge is being leveraged in the CAPITANO project, which has been funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy since June 2019, to realise improved perovskite/ACIGS multi-junction solar cells.

// PHOSPHOR-RECYCLING AUS KLÄRSCHLAMM

Ende 2020 wurde in Baden-Württemberg ein Leuchtturmprojekt für das Recycling von Phosphor aus Klärschlämmen gestartet. Im Projekt P-XTRACT – P für Phosphor, XTRACT für Extraktion – wird der Abwasserzweckverband Staufferer Bucht an der Kläranlage in Breisach-Grezhausen eine innovative 1-MW_{th}-Pilotanlage errichten, die anders als konventionelle Verfahren den Phosphor bereits während des Verbrennungsvorgangs in Form eines hochwertigen Ascheprodukts extrahiert. Das ZSW war an der Entwicklung der Basistechnologie beteiligt, die nun weiter optimiert und erstmalig industriell umgesetzt werden soll. Darüber hinaus wird das ZSW das Projekt wissenschaftlich begleiten, die verbesserte Prozesstechnik in einer eigenen Forschungsanlage praxisnah validieren und so den Transfer in den industriellen Pilotmaßstab unterstützen. Das Umweltministerium Baden-Württemberg und die EU fördern das Projekt mit 4,2 Millionen Euro.

// PHOSPHORUS RECYCLING USING SEWAGE SLUDGE

At the end of 2020, a flagship project on recycling phosphorus from sewage sludge was launched in Baden-Württemberg. In the P-XTRACT project – P for phosphorus, XTRACT for extraction – the Abwasserzweckverband Staufferer Bucht (Stauffer Bay Wastewater Association) will build an innovative 1-MW_{th} pilot plant at the Breisach-Grezhausen wastewater treatment plant that, unlike conventional processes, extracts phosphorus during the incineration process in the form of a high-quality ash product. ZSW was involved in the development of the underlying technology which is now to be further optimised and implemented on an industrial scale for the first time. Beyond that, ZSW will accompany the project scientifically, pre-validate the improved process technology under real-life conditions in its own research facility and, in doing so, support the transfer to an industrial pilot scale. The Baden-Württemberg Ministry of Environment and the EU are funding the project with 4.2 million euros.



// 15-kW_{th}-Wirbelschicht-Technikumsanlage im Versuchsbetrieb zum Phosphor-Recycling aus Klärschlamm.
 // 15-kW_{th} fluidised bed in the technical lab in trial operation mode for phosphorus recycling using sewage sludge.



// NEUBAU FÜR HYFAB-FORSCHUNGSFABRIK FÜR BRENNSTOFFZELLEN

Auf Brennstoffzellen ruhen große Hoffnungen – vor allem im Verkehrssektor. Sie werden neben Personenkraftwagen und Bussen auch für den Schwerlastverkehr immer interessanter. Ein Grund sind die neuen EU-Verordnungen, welche die Absenkung der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge um 15 % ab dem Jahr 2025 und um 30 % ab dem Jahr 2030 verlangen. Bis 2050 strebt die EU Klimaneutralität an und somit auch eine CO₂-freie Mobilität. Es gibt jedoch noch keine Massenfertigung dieser emissionsfreien Antriebstechnologie. Dies soll sich mit der Forschungsfabrik für Wasserstoff und Brennstoffzellen (HyFaB) ändern. Mit HyFaB etabliert das ZSW eine offene Industriepattform, um automatisierte Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren, Fabrikabnahmetests und Inbetriebnahmen von Brennstoffzellen-Stacks zu entwickeln. HyFaB ist offen für Partner aus der Automobil- und Brennstoffzellen-Zulieferindustrie sowie für Maschinen- und Anlagenbau, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Dazu fördert das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg ein Gebäude mit 3.300 Quadratmetern am ZSW-Standort Ulm. Die Inbetriebnahme ist für Anfang 2022 geplant. Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut übergab dem ZSW am 19. August 2020 den Förderbescheid über 10,5 Millionen Euro.

// A NEW BUILDING FOR THE HYFAB RESEARCH FACTORY FOR FUEL CELLS

Great hopes are being placed on fuel cells – especially by the transport sector. They are becoming increasingly interesting not only for passenger cars and buses but also for heavy goods vehicles. The new EU regulations requiring a reduction of CO₂ emissions from heavy commercial vehicles by 15 percent from 2025 onward and by 30 percent as of 2030 are a major impetus here. The EU is aiming for climate neutrality and therefore carbon-free mobility by 2050. However, this emission-free drive technology is not yet in mass production. This is set to change with the Research Factory for Hydrogen and Fuel Cells (HyFaB). With HyFaB, ZSW is establishing an open industry platform to develop automated manufacturing and quality assurance processes, factory acceptance tests and commissioning procedures for fuel cell stacks. HyFaB is open to partners from the automotive and fuel cell supplier industry and the mechanical and plant engineering sectors, especially small and medium-sized enterprises (SMEs). The Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs is funding a 3,300-square metre building at the ZSW location in Ulm. Commissioning is scheduled for the beginning of 2022. Baden-Württemberg's Minister for Economic Affairs, Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut, presented ZSW with the funding approval for 10.5 million euros on 19 August 2020.

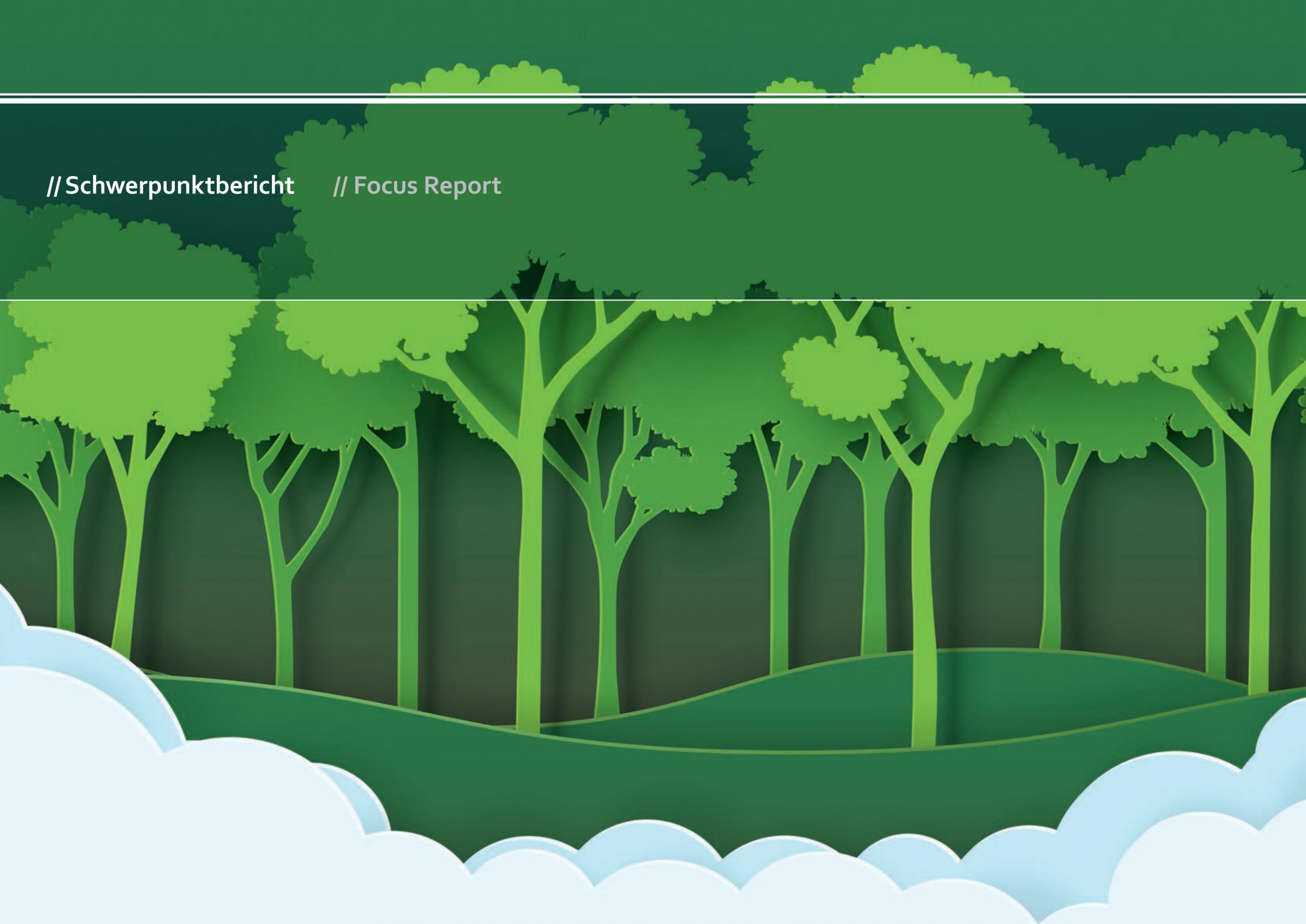
Link zur Webcam der Baustelle in Ulm
 Webcam to the construction site in Ulm
www.zsw-bw.de/ueber-uns/standorte.html#c583



// Blick mit der Webcam auf die Baustelle HyFaB am 23. März 2021.
 // Webcam view of the HyFaB construction site on 23 March 2021.

// Schwerpunktbericht

// Focus Report



// Batterien: Vom Material zum Produkt und wieder zurück

// Batteries: from the material to the product and back again



Erkenntnisse des Weltklimarates, die zunehmende Wahrnehmung der ersten Folgen des Klimawandels in der Bevölkerung sowie die wöchentlichen Demonstrationen der „Fridays for Future“-Bewegung schlugen sich in der Europawahl im Mai 2019 nieder und drängten die Politik zu deutlich ambitionierteren Klimaschutzzielen. So wurde im Herbst 2019 auf europäischer Ebene der Green Deal beschlossen, der die Transformation Europas zum weltweit ersten klimaneutralen Kontinent bis 2050 zum Ziel hat.

Findings published by the Intergovernmental Panel on Climate Change, the growing public awareness of the first consequences of climate change and the weekly demonstrations of the “Fridays for Future” movement had an impact on the European elections in May 2019 pushing politicians to set far more ambitious climate protection targets. In autumn 2019, for example, the Green Deal was adopted on a European level, and it is aimed at transforming Europe into the world’s first climate-neutral continent by 2050.

// Focus



LEITBILD KLIMANEUTRALITÄT BIS 2050

Auch auf internationaler Ebene vollzieht sich dieser Paradigmenwechsel: Im Januar 2020 standen anlässlich des World Economic Forum in Davos erstmals Umwelt- und Klimarisiken an der Spitze des Rankings der größten Bedrohungen für die Weltwirtschaft. Das Ziel der Klimaneutralität erfasste nun auch Branchen wie die energieintensive Grundstoffindustrie (Chemie, Stahl, Zement), den Flugverkehr und die internationale Seeschifffahrt, die bislang allenfalls moderate Klimaschutzvorgaben zu erfüllen hatten. Deren Transformation ist ohne grünen Wasserstoff – als Rohstoff, Hilfsstoff und Energieträger – und seine synthetischen Folgeprodukte nicht möglich.

Entsprechend verkündete die Bundesregierung im Juni die Nationale Wasserstoffstrategie, nach der Wasserstoff zukünftig neben Strom ein zentraler Energieträger sein wird. Neben der Formulierung klarer Ziele für die Herstellung von Wasserstoff aus Wasser mittels Elektrolyse wurden mit neun Milliarden Euro zusätzliche Mittel zur Förderung des Markthochlaufs von Wasserstofftechnologien bereitgestellt. Im August 2020 folgte das Kohleausstiegsgesetz (Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung) mit der Vorgabe, stufenweise die Erzeugung von Strom aus Kohle bis zum Jahr 2038 auf null herunterzufahren. Zusammen mit dem bereits beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie Ende 2022 wird sich die Stromerzeugung in Deutschland somit massiv in Richtung regenerativ erzeugten Stroms verschieben. Hier gab es im Jahr 2020 Gutes zu berichten: Etwa 46% des erzeugten Stroms kamen aus regenerativen Quellen und somit ca. 5% mehr als im Jahr zuvor. Der Covid-19-bedingte geringere Strombedarf und ein sonniges und windreiches Jahr haben dazu geführt, dass die Bundesrepublik Deutschland ihr selbstgestecktes Ziel einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 40% im Vergleich zum Referenzjahr 1990 doch noch erreichen konnte.

AMBITIONIERTER CO₂-ZIELE FÜR DEUTSCHLAND BIS 2030

Die vielleicht wichtigste Entscheidung fiel jedoch im Dezember 2020 auf europäischer Ebene: Der Europäische Rat beschloss auf dem Weg zur Klimaneutralität der Europäischen Union auch eine Verschärfung der Mittelfristziele für das Jahr 2030 auf minus 55% statt wie bisher minus 40%. Für Deutschland könnte das bedeuten, dass bis 2030 eine Treibhausgasreduktion von 65% statt wie bisher angestrebt von 55% erreicht werden muss – im Vergleich zum Referenzjahr 1990. Dies wird den Druck zur Emissionsminderung insgesamt deutlich erhöhen, insbesondere in jenen Sektoren, die bisher nur wenig zur CO₂-Reduktion beigetragen

THE POLICY GUIDELINE OF CLIMATE NEUTRALITY BY 2050

An international paradigm shift is underway: in January 2020, on the occasion of the World Economic Forum in Davos, environmental and climate risks topped the ranking of the greatest threats to the global economy for the first time. Climate neutrality as a goal now also extends to sectors such as the energy-intensive raw material industry (chemicals, steel and cement), air traffic and international shipping which previously had to meet only moderate climate protection targets at best. Their transformation will not be possible without green hydrogen – as a raw material, additive and as an energy carrier – as well as its synthetic derivatives.

Consequently, the German government announced the National Hydrogen Strategy in June, according to which hydrogen will become a central energy carrier alongside electricity. In addition to formulating decisive targets for the production of hydrogen from water through electrolysis, nine billion euros in additional funding was made available to promote the market ramp-up of hydrogen technologies. In August 2020, the Coal Phase-out Act (Gesetz zur Reduzierung und zur Beendigung der Kohleverstromung) followed up with the requirement to gradually scale down the generation of electricity from coal to zero by 2038. Together with the already decided phase-out of nuclear energy by the end of 2022, electricity generation in Germany will shift massively towards electricity generated from renewable energy sources. In this regard, there were some good things to report about in 2020: about 46% of the electricity was generated from renewable energy sources, which is about 5% more than the year before. The lower demand for electricity as a result of COVID-19 and a sunny and windy year meant that Germany was able to achieve its self-imposed target of a 40% reduction in CO₂ emissions compared to the reference year 1990.

AMBITIOUS CO₂ TARGETS FOR GERMANY BY 2030

Perhaps the most important decision, however, was made at the European level in December 2020: the European Council decided to tighten the medium-term targets for the year 2030 to minus 55% instead of minus 40% on the way to a climate-neutral European Union. For Germany, this could mean that a greenhouse gas reduction of 65% instead of the previous target of 55% must be achieved by 2030 – compared to the reference year 1990. This will significantly increase the urgency of reducing emissions overall, especially in those sectors that have so far contributed little to CO₂ reduction.

Country	New registrations	Change vs. prior year in percent
China	1,246,000	↗ 3
Germany	394,632	↗ 264
USA	322,400	↘ -2
France	194,700	↗ 180
Great Britain	175,100	↗ 140
Norway	108,200	↗ 27
Sweden	94,080	↗ 125
Netherlands	87,950	↗ 31
Italy	59,950	↗ 250
Canada	53,180	↗ 4
Japan	29,350	↘ -25
Austria	23,610	↗ 107
Worldwide	3,183,012	↗ 38

haben. Genannt seien hier insbesondere der Verkehr, aber auch der Gebäudesektor und die Landwirtschaft. Doch gerade bei der individuellen Mobilität, also bei der privaten Nutzung von Kraftfahrzeugen, hat sich im Jahr 2020 eine Entwicklung massiv beschleunigt, die vor zehn Jahren mit ersten Serienmodellen begonnen hat: der Einstieg in die Elektromobilität.

MOBILITÄT OHNE EMISSIONEN

Während erneuerbare Energien Jahr für Jahr einen steigenden Anteil an der Gesamtstromerzeugung bereitstellen, basiert unsere Mobilität auf der Verbrennung von fossilen Kohlenwasserstoffen. Dies gilt für den Personenverkehr, den Güterverkehr auf der Straße, den nicht-elektrifizierten Schienenverkehr und den gesamten Flug- und Schiffsverkehr. Die Mobilität im Straßenverkehr in der Bundesrepublik Deutschland beruht somit abgesehen von geringen Anteilen an Biokraftstoffen fast vollständig auf Mineralöl und den hieraus gewonnenen Kraftstoffen Benzin und Diesel. Im Gegensatz zum elektrischen Strom ist Deutschland beim Erdöl jedoch zu fast 100 % auf Importe angewiesen.

HERAUSFORDERUNG STRASSENVERKEHR

Der weiterhin hohe Wille zur individuellen Mobilität mit dem eigenen Pkw sowie die stetig zunehmenden Gütermengen im Straßenverkehr haben zur Folge, dass die CO₂-Emissionen aus dem Verkehrssektor in Deutschland seit dem Jahr 1990 nahezu konstant geblieben sind. In absoluten Zahlen bewegen sich die Werte zwischen 160 und 170 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (mit Ausnahme des Covid-19-Jahres 2020). Einer ständig besser werdenden Motorentechnologie mit reduziertem Kraftstoffverbrauch

Notable here are transport, the building sector and agriculture. In particular in the area of individual mobility, that is the private use of motor vehicles, a development that began 10 years ago with the first series-produced models massively accelerated in 2020: the transition towards electromobility.

EMISSION-FREE MOBILITY

While renewable energy sources account for an ever-increasing share of total electricity generation each year, our mobility is still based on the combustion of fossil hydrocarbons. This applies to personal transport, freight transport by road, non-electrified rail transport and all air and sea transport. Mobility in road transport in the Federal Republic of Germany is therefore based almost entirely on mineral oil and the fuels derived from it, petrol and diesel, apart from minor shares of biofuels. In contrast to electricity, however, Germany is almost entirely dependent on imports when it comes to oil.

THE CHALLENGE OF ROAD TRANSPORT

The continued strong desire for individual mobility with one's own car and the steadily increasing volume of goods transported by road have meant that CO₂ emissions from the transport sector in Germany have remained almost constant since 1990. In absolute terms, the values range between 160 and 170 million tonnes of CO₂ equivalents (with the exception of the COVID-19 year 2020).

// Focus



standen im Wesentlichen vier Faktoren gegenüber, welche diese technischen Fortschritte kompensierten:

1) die kontinuierliche Zunahme der Motorisierung, 2) das kontinuierlich zunehmende Fahrzeuggewicht, 3) die zunehmende Marktdurchdringung von SUVs und 4) ein teilweise starker Rückgang der Dieselseufahrzeuge nach dem Dieselskandal im Jahr 2015. Weiterhin muss festgestellt werden, dass zahlreiche staatliche Anreize zur Reduktion des Individualverkehrs und zum Umstieg auf den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) in Deutschland nur wenige Anhänger fanden, was primär am mangelnden Angebot und den vermeintlich hohen Kosten liegt. Es soll hier jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass diese Problematik nicht nur auf Deutschland beschränkt ist. Ganz im Gegenteil: In fast allen Ländern der Welt stellt der Mobilitätssektor bezüglich einer gewünschten CO₂-Reduktion ein Sorgenkind dar.

DER BATTERIEANTRIEB

Von zentraler Bedeutung für die Reduktion der Treibhausgasemissionen und anderer negativer Umwelteffekte sind elektrisch betriebene Fahrzeuge, deren Markthochlauf beginnt. Diese Fahrzeuge stoßen im Fahrbetrieb kein CO₂ aus. Und auch in der Betrachtung der gesamten Energiekette inklusive Stromherstellung und Batterieproduktion stellt sich der batteriebasierte Elektroantrieb als sehr effizient und vorteilhaft dar. Bei wachsendem Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix nehmen die Vorteile weiter dynamisch zu. Die eingesetzten Lithium-Ionen-Batterien überzeugen durch hohe Energiedichten, gute Zyklenzahl (d. h. Fahrleistung bzw. Lebensdauer) sowie durch hohe Effizienz beim Laden und Entladen. Zudem konnten über die letzten Jahre hinweg die Kosten dieser Batteriesysteme so weit reduziert werden, dass batteriebetriebene Elektrofahrzeuge mehr und mehr für breite Bevölkerungsschichten erschwinglich werden. Bereits die ersten Serienfahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien, die ab dem Jahr 2010 auf den Markt kamen, erzielten größere Reichweiten als vergleichbare Batteriefahrzeuge in der Vergangenheit mit anderen Batterietypen wie dem Bleiakumulator oder Nickelmetallhydrid-Batterien. Zudem zeigte sich in den ersten Jahren mit diesen Fahrzeugen in Kundenhand, dass sowohl die Sicherheit als auch die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Batterie deutlich besser ist als ursprünglich gedacht und z. B. ein Batterieaustausch nach einigen Jahren Betrieb nicht notwendig ist.

Constantly improved engine technology with reduced fuel consumption was offset by four main factors that counteracted these technological advancements: 1. ongoing increase in motorisation, 2. continuously increasing vehicle weight, 3. increasing market penetration of SUVs and 4. a somewhat sharp decline in new diesel vehicles after the diesel scandal in 2015. It should also be noted that various government incentives to encourage a reduction in private transport and a transition to local public transport in Germany have found only few supporters, primarily due to a lack of offers and the supposedly high costs. However, it should not go unmentioned that this problem is not unique to Germany. On the contrary: in almost all countries around the world, the mobility sector is particularly challenging as regards achieving the envisioned reduction of CO₂ emissions.

THE BATTERY DRIVE

Electrically powered vehicles are a key factor when it comes to curbing greenhouse gas emissions and other negative environmental effects. These vehicles do not emit any CO₂ when driven. And when considering the entire energy chain, including electricity generation and battery production, their battery-powered electric drive has again proven to be very efficient and advantageous. With the increasing share of renewable energies in the electricity mix, the advantages continue to advance dynamically. The lithium-ion batteries used here are attractive due to their high energy densities, high cycle numbers (service life) and high efficiency while charging and discharging. In addition, the costs of these battery systems have been brought down over the last few years to such an extent that battery-powered electric vehicles are becoming more and more affordable for a larger segment of the population. The first series-produced vehicles with lithium-ion batteries, launched in 2010, already achieved greater ranges than comparable battery vehicles of the past with other battery types such as lead accumulators or nickel metal hydride batteries. Furthermore, the first years with these vehicles under customer ownership showed that both the safety and longevity of lithium-ion batteries are significantly better than originally thought and that, for example, battery replacement is not necessary already after a few years of operation.



CHINA ALS TREIBER FÜR CO₂-FREIE PKW MIT LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

Neben den stetigen technischen Verbesserungen der Lithium-Ionen-Technologie bei gleichzeitig sinkenden Kosten hat die politische Strategie der Volksrepublik China maßgeblich zum Erfolg dieser Technologie geführt. Durch eine klare Fokussierung auf die Lithium-Ionen-Batterie für eine CO₂-freie Mobilität, eine starke Subventionierung von Batterieproduktionskapazitäten und batteriebetriebenen Fahrzeugen, eine Mandatierung der Neuzulassungen und eine dem jeweiligen Technologiestand angepasste Gesetzgebung wurde diesem Antriebssystem der Weg in den Massenmarkt geebnet. Europäische Pkw-Hersteller, die alle einen zweistelligen Prozentanteil ihrer Neufahrzeuge in China verkaufen, konnten sich diesem Trend nicht entziehen. Es ist somit nicht überraschend, dass die Volksrepublik China in den letzten Jahren die globale Zulassungsstatistik für Elektrofahrzeuge angeführt hat und dabei fast ausschließlich Fahrzeuge chinesischer Hersteller zugelassen wurden, weil sie zur Erreichung einer Steuergutschrift ausschließlich komplett in China produzierte Batteriesysteme nutzen mussten.

DIE LITHIUM-IONEN-BATTERIE ALS ENABLER EINER CO₂-FREIEN MOBILITÄT

Bei Lithium-Ionen-Batterien macht man sich zunutze, dass das chemische Element Lithium mit ca. 4 Volt die höchste Spannung liefert. Diese Spannung ist mehr als doppelt so hoch wie bei handelsüblichen Batterien im AA-Rundzellenformat (1,5 Volt). Zudem ist Lithium das drittleichteste chemische Element. Somit sind Lithium-Ionen-Batterien auch deutlich leichter als zum Beispiel Bleibatterien. Innerhalb einer Lithium-Ionen-Batterie bewegen sich Lithium-Ionen beim Laden vom positiven Pol (Kathode) zum negativen Pol (Anode) und beim anschließenden Entladen wieder zurück. An beiden Polen wird das Lithium dabei in Schichtstrukturen eingelagert: an der Anode in Graphit oder Kohlenstoff und an der

CHINA AS A DRIVING FORCE FOR CO₂-FREE CARS WITH LITHIUM-ION BATTERIES

In addition to the constant technical improvements being made to lithium-ion technology while costs are dropping, the political strategy of the People's Republic of China has played a major role in the success of this technology. A clear focus on lithium-ion batteries for CO₂-free mobility, major subsidies for battery production capacities and battery-powered vehicles, a mandate for new registrations and legislature adapted to the current state of technology have paved the way for this drive system to enter the mass market. European car manufacturers, who all sell a double-digit percentage of their new vehicles in China, were not able to escape this trend. It is therefore unsurprising that the People's Republic of China has led the global registration statistics for electric vehicles in recent years, with vehicles from Chinese manufacturers being registered almost exclusively because tax credits were only available for battery systems produced entirely in China.

THE LITHIUM-ION BATTERY AS AN ENABLER OF CO₂-FREE MOBILITY

Lithium-ion batteries take advantage of the fact that the chemical element lithium delivers the highest voltage of about 4 volts. That is more than twice the voltage of standard AA household batteries (1.5 volts). In addition, lithium is the third lightest chemical element. Lithium-ion batteries are much lighter than lead-acid batteries, for example. Inside a lithium-ion battery, lithium ions move from the positive pole (cathode) to the negative pole (anode) while charging and then back again when discharging. At both poles, the lithium is embedded within layer structures: at the anode in graphite or carbon and at the cathode in a lattice of different metals and oxygen.



Kathode in ein Gitter aus unterschiedlichen Metallen und Sauerstoff. Der Einsatz von stabilen „Trägerstrukturen“ für Lithium an beiden Polen der Zelle macht diesen Batterietyp einzigartig und erlaubt das Verschieben von Lithium-Ionen von einem Pol zum anderen in fast unbegrenzter Anzahl. So ist es auch nicht verwunderlich, dass für die Entdeckung eben dieser Schichtstrukturen im Jahr 2019 der Nobelpreis für Chemie an John B. Goodenough (USA), M. Stanley Whittingham (England) und Akira Yoshino (Japan) vergeben wurde. Ihre grundlegenden Arbeiten lieferten die Basis, auf der Sony vor 30 Jahren Lithium-Ionen-Batterien in den Markt einführen konnte.

The use of stable “carrier structures” for lithium at both poles of the cell makes this type of battery unique in that it allows lithium ions to be moved from one pole to the other in almost unlimited quantities. It is therefore not surprising that the Nobel Prize in Chemistry was awarded in 2019 to John B. Goodenough (USA), M. Stanley Whittingham (England) and Akira Yoshino (Japan) for the discovery of precisely these layer structures. Their groundbreaking work provided the foundation on which Sony was able to introduce lithium-ion batteries to the market 30 years ago.

ROHSTOFFE FÜR LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

RAW MATERIALS FOR LITHIUM-ION BATTERIES

Die eingesetzten Materialien einer Lithium-Ionen-Batterie bestimmen im Wesentlichen die Kosten und die Performance. Etwa 70% der Gesamtkosten von Lithium-Ionen-Batterien entfallen auf die Materialien und nur 30% auf Produktion, Abschreibung, Allgemerkosten, R&D und Gewinnmarge. Aber auch die Performance und dabei insbesondere der Energieinhalt und die Sicherheit einer Batterie werden durch die eingesetzten Materialien maßgeblich bestimmt. Aus diesem Grund stehen die Batteriematerialien nach wie vor im Fokus intensiver Entwicklungsarbeiten. Auch heute noch besteht bei allen Materialien großes Entwicklungspotenzial. Außer der Erhöhung des Energieinhalts werden die Materialien in Richtung niedrigerer Kosten, besserer Prozessierbarkeit und Lebensdauer optimiert.

The materials used in a lithium-ion battery largely determine its cost and performance. About 70% of the total cost of lithium-ion batteries is attributable to the materials and only 30% to production, depreciation, overheads, R&D and profit margin. However the materials used also significantly determine battery performance, especially energy content and safety. For this reason, battery materials have been and still are the focus of extensive development work. Even today, there is still great development potential for all materials. In addition to increasing the energy content, the materials are being optimised in terms of costs, processability and service life.



// Professionelle Zellöffnungen und Post-mortem-Analysen ermöglichen es, Schädigungsmechanismen an Batterien zu identifizieren.
// Professional cell openings and post-mortem analyses make it possible to identify damage mechanisms in batteries.



Obwohl die Lithium-Ionen-Batterie nach dem Schlüsselement Lithium benannt ist, liegt der Anteil des Lithiums am Gesamtgewicht einer solchen Batterie bei nur 6–7%. Der Rest entfällt auf andere Metalle wie Nickel, Kobalt oder Mangan (zusammen ca. 60 Gewichtsprozent) und Sauerstoff. Dazu kommen dann noch die weiteren Kernkomponenten der Batterie: Graphit als Anode, ein organischer Elektrolyt, ein Polymerseparator und, ebenfalls nicht zu vernachlässigen, die Stromableiterfolien aus Aluminium und Kupfer. Außerhalb der Batteriezelle kommen dann noch nennenswerte Mengen an Kupferkabel sowie entweder Aluminium oder Edelstahl für den Batteriepack hinzu. Bezieht man den Gewichtsanteil des Lithiums nicht nur auf die einzelne Batteriezelle, sondern auf den gesamten Batteriepack, so reduziert sich der Gewichtsanteil weiter auf teilweise unter zwei Gewichtsprozent.

LITHIUM ALS SCHLÜSSELEMENT

Lithium stellt einen kritischen Rohstoff dar, da es durch kein anderes Element substituiert werden kann. Lithium wird heute zum größten Teil aus Solen von Salzseen in den südamerikanischen Anden gewonnen. In einem komplexen Verdampfungsprozess, basierend ausschließlich auf Sonneneinstrahlung, wird über 18 Monate hinweg die Salzsole mittels fraktionierter Kristallisation bezüglich Lithiumcarbonat angereichert. Dabei verdampfen große Mengen Wasser, um vom ursprünglichem Lithiumgehalt von < 2.000 ppm (= 0,2 Gewichtsprozent) auf ein Konzentrat von ca. neun Gewichtsprozent zu gelangen, welches dann zu Lithiumcarbonat oder zu Lithiumhydroxid (LiOH) hoher Reinheit weiterverarbeitet wird. Nicht zuletzt aus ökologischen Gründen ist die Herstellung von Lithiumhydroxid aus lithiumhaltigen Mineralien wie Spodumen-

Although the lithium-ion battery is named after the key element lithium, the proportion of lithium relative to the total weight of such a battery is only 6–7%. The rest is made up of other metals such as nickel, cobalt or manganese (together approx. 60% by weight) and oxygen. Then there are the other core components of the battery: graphite as the anode, an organic electrolyte, a polymer separator and, also significant, the current-conducting foils made of aluminium and copper. Outside of the battery cell itself, there are also appreciable amounts of copper cable and either aluminium or stainless steel for the battery pack. If the weight percentage of lithium is not only set in relation to the individual battery cell, but to the entire battery pack, the weight percentage is further reduced to less than 2 percent by weight in some cases.

LITHIUM AS A KEY ELEMENT

Lithium is a critical raw material because it cannot be substituted by any other element. Today, most lithium is sourced from salt lake brines in the South American Andes. In a complex evaporation process relying exclusively on solar irradiation, the brine becomes enriched in lithium carbonate through fractional crystallisation over a period of 18 months. Large amounts of water evaporate in order to achieve a concentrate of approx. 9 percent by weight compared to the original lithium content of < 2,000 ppm (= 0.2 percent by weight) which is then further processed to lithium carbonate or lithium hydroxide (LiOH) with a high degree of purity. The production of lithium hydroxide from lithium-containing minerals such as spodumene minerals (LiAl[Si₂O₆]) is more

mineralien (LiAl[Si₂O₆]) eleganter, da sie Lithium im einstelligen Prozentbereich enthalten. Es gibt große Spodumenvorkommen in Australien, China, den USA, Kanada und weiteren Ländern und es wird mehr und mehr Lithium aus dieser mineralischen Quelle gewonnen.

GRAPHITISCHE ANODEN

Aber bereits beim Graphit der Anode sind die natürlichen Vorkommen begrenzt und liegen zu über 60% in China und somit nur in einem einzigen Land mit hohem Eigenbedarf. Und die mechanische Umarbeitung des natürlichen Graphits in kleine kugelförmige Partikel für den Einsatz in der Lithium-Ionen-Batterie verursacht hohe Materialverluste von teilweise mehr als 50%. Hier setzt das Projekt RONDO an, in dem das ZSW zusammen mit Kohlenstoffherstellern versucht, die Verlustrate deutlich zu reduzieren und hierdurch die Ausbeute an verwertbarem Graphit zu steigern. Aber es gibt auch künstlich hergestellte Graphite im Markt, welche auf amorphem Kohlenstoff oder Polymeren beruhen. Die Herstellung von künstlichem Graphit erfordert allerdings sehr hohe Temperaturen und lange Verweilzeiten in Elektroöfen und ist somit sehr stromintensiv. Nur beim Einsatz von grünem Strom ist der Gesamtprozess umweltfreundlich und kann somit erst auf lange Sicht die notwendigen Graphitmengen für den Markthochlauf CO₂-frei produzierter Lithium-Ionen-Batterien liefern.

AUF DEM WEG ZU KOBALTFREIEN KATHODEN

Kobalt ist das vielleicht kritischste Metall in Lithium-Ionen-Batterien. Die Vorräte sind ebenfalls begrenzt und Kobalt ist meist nur ein Beiprodukt bei der Förderung anderer Metalle wie Nickel und Kupfer. Die wenigen reinen Vorkommen von Kobalterzen liegen in der Demokratischen Republik Kongo, wo jedoch ein nennenswerter Teil des Metalls mittels Kinderarbeit in illegalen Minen gewonnen wird. Auch der hohe Preis des Kobalts hat bereits in den letzten Jahren dazu geführt, dass der Anteil dieses Metalls im Kathodenmaterial auf ca. zehn Gewichtsprozent gesunken ist (Nickel-Kobalt-Mangan (NCM-622)) und die nächste Generation an Kathodenmaterialien wird nur noch fünf Gewichtsprozent Kobalt enthalten (NCM-811). Noch weiter fortgeschritten ist Tesla mit dem verwendeten NCA, der bereits heute unter fünf Gewichtsprozent Kobalt enthält. Es laufen derzeit zahlreiche Entwicklungen in der Industrie und der Wissenschaft, den Kobaltgehalt weiter bis auf null abzusenken.

elegant, not least for ecological reasons, as they contain lithium in the single-digit percentage range. Large deposits of spodumene exist in Australia, China, the United States, Canada and other countries, and more and more lithium is being extracted from this mineral source.

GRAPHITE ANODES

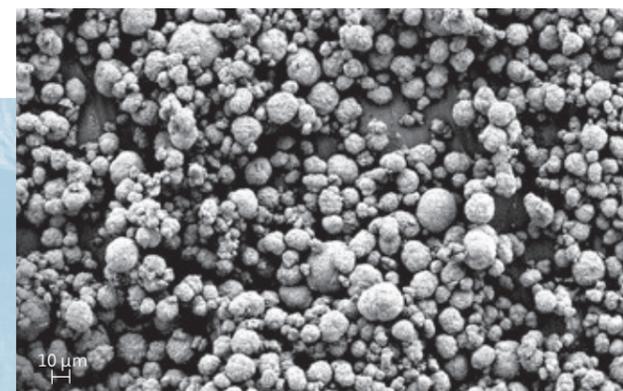
Already the natural deposits of graphite for the anode are limited, with more than 60% of them located in China and thus only in one country with a high domestic demand. The mechanical conversion of natural graphite into small spherical particles to be used in lithium-ion batteries results in high material losses of more than 50% in some cases. This is where the RONDO project enters the picture, in which ZSW, together with carbon producers, is seeking to significantly reduce the loss rate and thereby increase the yield of usable graphite. While there are also artificially produced graphites on the market, based on amorphous carbon or polymers, the production of artificial graphite calls for very high temperatures and long dwell times in electric furnaces and is thus very electricity intensive. The entire process is thus only environmentally friendly with the use of green electricity, which means that it will take a long time before the necessary quantities of graphite can be produced for the market ramp-up of CO₂-free lithium-ion batteries.

ON THE WAY TO COBALT-FREE CATHODES

Cobalt is perhaps the most critical metal in lithium-ion batteries. Supplies are limited and cobalt is mostly a by-product of mining other metals such as nickel and copper. The few pure deposits of cobalt ore are in the Democratic Republic of Congo where, problematically, a significant portion of the metal is extracted through child labour in illegal mines. Also because of the high price of cobalt, the proportion of this metal in cathode materials has been reduced to about 10 percent by weight (nickel-cobalt-manganese (NCM-622)), and the next generation of cathode materials will contain only 5 percent cobalt by weight (NCM-811). Tesla is a step ahead with the NCA it uses, as it already contains less than 5 percent cobalt by weight. There are a number of developments underway in the industry and academia to further reduce the cobalt content to zero.

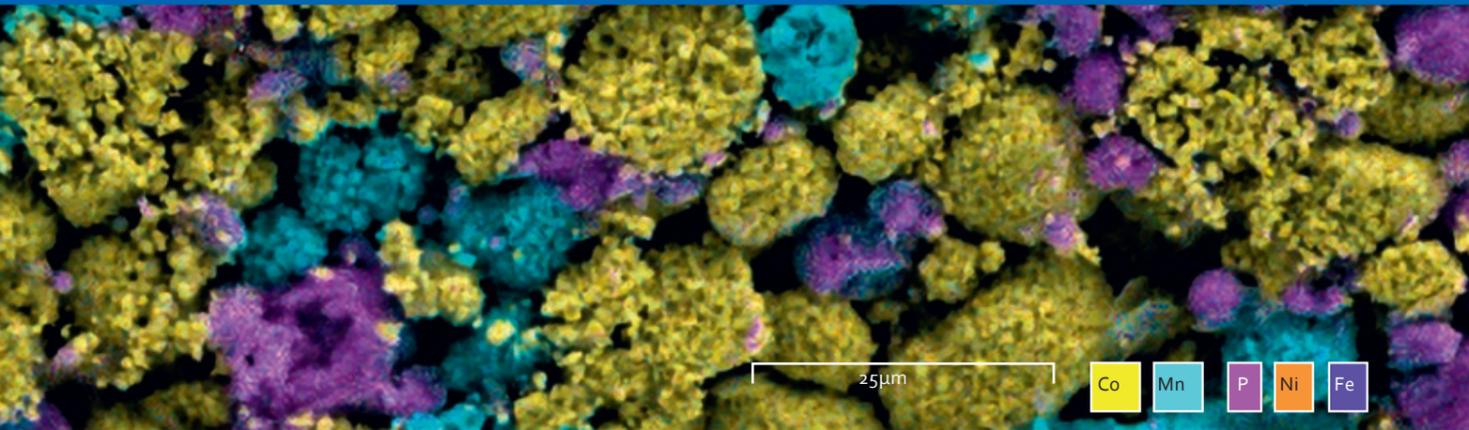


// REM-Aufnahme von durch Rundungsprozesse veredeltem Naturgraphit.
// SEM image of natural graphite upgraded via rounding processes.



// Das ZSW entwickelt seit Jahren kobaltfreie Kathodenmaterialien (REM-Aufnahme) auf der Basis von kobaltfreiem Lithium-Nickel-Manganoxid (NCM).
// ZSW has been developing cobalt-free cathode materials (SEM image) based on cobalt-free lithium nickel manganese oxide (NCM) for several years already.

DIE LITHIUM-IONEN-BATTERIE NEU GEDACHT THE LITHIUM-ION BATTERY REIMAGINED



Um den Kobaltanteil zu reduzieren, werden hochnickelhaltige Kathodenmaterialien in den nächsten Jahren den Markt dominieren, wofür derzeit die Förderkapazitäten für Nickel weltweit ausgebaut werden. Das ZSW befasst sich im Rahmen des BMBF-Dachkonzepts Batterie intensiv mit der Charakterisierung solcher Materialien inklusive der hierauf abgestimmten Elektrolyte und Elektroden. Batterien mit hochnickelhaltigen Elektroden sind intrinsisch instabil. Dennoch hat die Industrie gelernt, solche Batterien in sichere Batteriepacks zu verbauen. Dabei helfen auch Zwischenlagen aus Materialien, welche im Schadensfall beispielsweise das Ausbreiten eines Feuers verhindern. Solche sog. Barrierematerialien werden am ZSW entwickelt und im hauseigenen Testzentrum geprüft.

Mittelfristig werden dann Schritt für Schritt manganreiche Kathodenmaterialien mit geringem Nickelanteil und frei von Kobalt in den Markt eingeführt werden. Derartige Materialien werden am ZSW seit vielen Jahre intensiv beforscht und wurden im Projekt ExcellBattMat bereits in den 10-kg-Maßstab hochskaliert. Im Projekt HighSafe werden zusammen mit Partnern aus Deutschland und Taiwan die Materialien in Testbatterien verbaut und auf ihre Sicherheit getestet. Die Weiterentwicklung der Kathodenmaterialien hat das Ziel, die spezifischen Kosten in Euro pro Kilowattstunde zu senken und gleichzeitig die Energiedichte in Euro/Liter und Euro/kg noch weiter zu erhöhen. Diese Entwicklung verlief und verläuft immer noch stürmisch und hat in den letzten Jahren maßgeblich dazu beigetragen, die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien in Fahrzeugen deutlich zu senken und gleichzeitig deren Reichweite deutlich zu erhöhen.

In order to reduce the cobalt content, high-nickel cathode materials will dominate the market in the next couple of years, and in preparation the extraction capacities for nickel are currently being expanded worldwide. ZSW is focusing intensively on the characterisation of such materials, including the electrolytes and electrodes designed for them, as part of the BMBF's umbrella concept for batteries. Batteries with high-nickel electrodes are intrinsically unstable. Nevertheless, the industry has learned to assemble these batteries into safe battery packs, for example by incorporating intermediate layers of materials that prevent the spread of fire in the event of damage. These so-called barrier materials are being developed at ZSW and inspected at the in-house test centre.

In the medium term, manganese-rich cathode materials with a low nickel content and without cobalt will be introduced to the market step by step. Such materials have been intensively researched at ZSW for many years and have already been scaled up to the 10-kg scale in the ExcellBattMat project. In the HighSafe project, the materials are being installed in test batteries together with partners from Germany and Taiwan and tested for their safety. The further development of the cathode materials has the objective of reducing the specific costs in euros per kilowatt hour and at the same time further increasing the energy density in euros/litre and euros/kg. This development has been, and still is, progressing at a breakneck pace and has made a significant contribution in recent years towards substantially reducing the cost of lithium-ion batteries in vehicles while, at the same time, significantly increasing their range.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Kathodenmaterialien in der Lithium-Ionen-Batterie und die stark zunehmenden Produktionsvolumina waren die maßgeblichen Treiber, welche zu hochwertigen und erschwinglichen Batterien geführt haben. Parallel hierzu wurden in den letzten Jahren auch die Arbeiten zu alternativen Anodenmaterialien auf Basis von Silizium intensiviert. Das ZSW nimmt sich im Projekt SiDrive dieses Themas an und arbeitet an der Kombination von kobaltfreien, energiereichen Kathodenmaterialien mit neuartigen Siliziumanoden.

The continuous development of cathode materials in lithium-ion batteries and the rapidly rising production volumes were the main drivers that led to high-quality and affordable batteries. At the same time, work on alternative anode materials based on silicon has also been ramped up in recent years. ZSW is addressing this research topic in the SiDrive project and is working on pairing cobalt-free, high-energy cathode materials with novel silicon anodes.

DIE FRAGE DES ZELLFORMATS

Aber auch außerhalb der Materialien erfährt die Lithium-Ionen-Batterie derzeit an vielen Stellen ein Redesign. Dabei wird immer klarer, dass es ein einheitliches Batterieformat nicht gibt. Heute und zukünftig dürften vermutlich drei große Zellformattypen gebaut werden: Rundzellen, die z. B. von Tesla eingesetzt und weiterentwickelt werden, prismatische Hardcase-Zellen, wie sie VW in den eigenen Batterien einsetzen wird, und die Pouchzellen, die primär von koreanischen Anbietern wie Samsung SDI, SK Innovation oder LG Chem produziert werden. Aber es gibt auch Entwicklungen weg von diesen Standards: Im Projekt Agilobatt wird untersucht, ob auf einer flexiblen Produktionsstraße Batterien ganz unterschiedlicher Geometrien exakt passend für jeweils individuelle Endgeräte kostengünstig gefertigt werden können.

A QUESTION OF CELL FORMAT

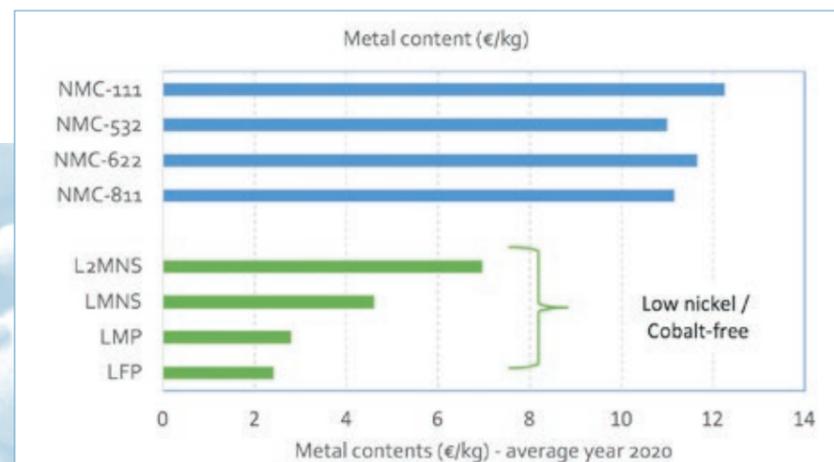
The lithium-ion battery is currently undergoing a redesign in many aspects beyond the materials themselves. It is becoming increasingly clear that there is no single battery format. Today and in the future, three major cell format types are likely to be produced: round cells which are being used and further developed by Tesla, for example prismatic hardcase cells, such as VW will use in its own batteries, and the pouch cells which are primarily produced by Korean suppliers such as Samsung SDI, SK Innovation or LG Chem. But there are also developments departing from these standards: the Agilobatt project is investigating whether batteries of very different geometries could be produced cost-effectively on a flexible production line to precisely fit individual end devices.

NMP-FREIE ELEKTRODEN

Im Projekt Tropex geht es um die Substitution toxischer Lösungsmittel, insbesondere des N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP), welches bei der Beschichtung von Batterieelektroden eingesetzt wird. NMP gilt unter der Europäischen Chemiegeseztgebung (REACH) als „besonders besorgniserregender und fortpflanzungsgefährdender Stoff“ mit der dringenden Aufforderung des Gesetzgebers, von der Verwendung abzusehen bzw. intensiv nach Substitutionsmaterialien zu suchen. Im Projekt TROPEX versuchen WissenschaftlerInnen am ZSW, diesbezüglich einen Königsweg zu finden, indem sie nicht nur komplett auf NMP verzichten, sondern on top sogar das teure flüssigkeitsbasierte Beschichtungsverfahren für Batterieelektroden

NMP-FREE ELECTRODES

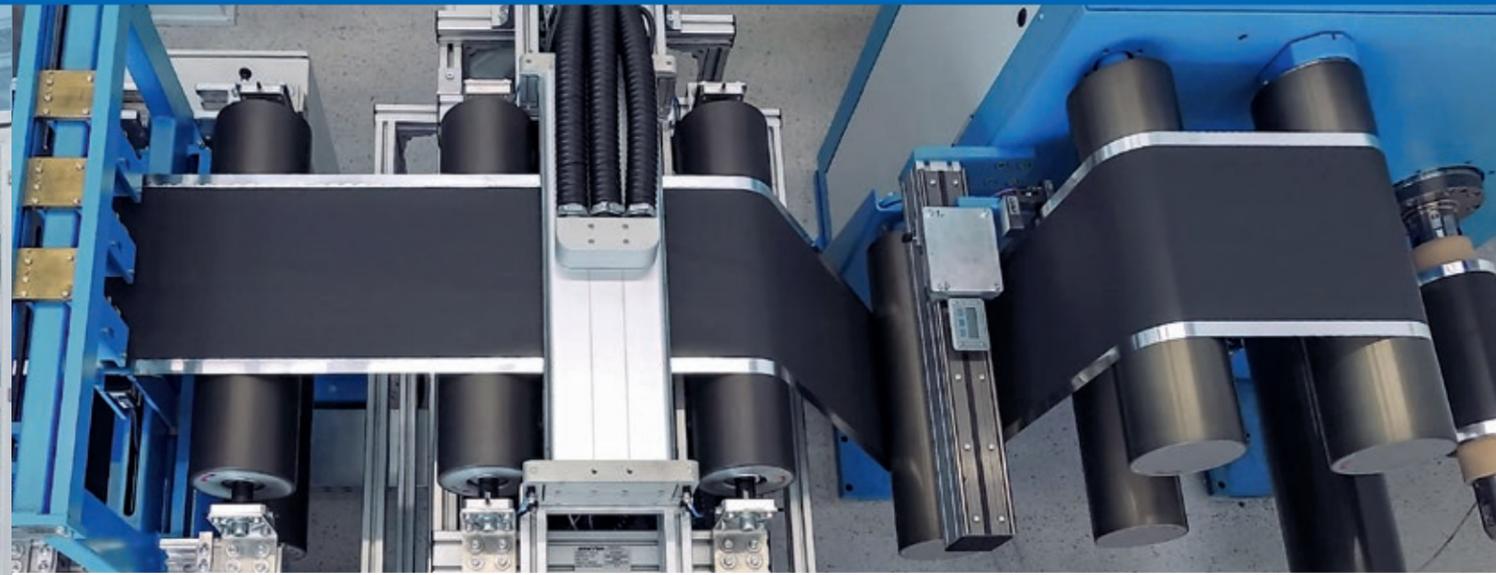
The Tropex project is investigating the substitution of toxic solvents, especially N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) which is used in the coating of battery electrodes. NMP is considered a “substance of very high concern and toxic for reproduction” under the European chemicals legislation (REACH), with the urgent request to refrain from its use or search intensively for substitute materials. Within the TROPEX project, ZSW researchers are trying to find the iconic silver bullet by not only completely eliminating NMP but, on top of that, even fully avoiding the expensive liquid-based coating process for battery electrodes.



// Die Metallanteile der Kathodenmaterialien bestimmen maßgeblich den Preis der Batterien.
// The metal content of the cathode materials largely determines the price of the batteries.



// Forschungsanlage, um Elektroden in einem Schritt trocken zu extrudieren, prozessieren und in der Zelle weiterzuverarbeiten.
// Research plant to dry extrude, process and further finish electrodes in the cell in one step.



komplett zu eliminieren. Dazu wird die Elektrode in einem Schritt trocken extrudiert, prozessiert und in der Zelle weiterverarbeitet. Das ZSW hat die hierfür notwendigen Extruder installiert und wird nun diese Technologie zum Proof of Concept weiterentwickeln.

POTENZIALE IN DER PRODUKTION

Bei der mechanischen Fertigung von Batterien forscht das ZSW ebenfalls an Verbesserungspotenzialen. Hier wird untersucht, wie sich die Endperformance einer Batterie mit den einzelnen Fertigungsschritten in Zusammenhang bringen lässt. Im Projekt Rollbatt versuchen die WissenschaftlerInnen des ZSW, verbesserte Rundzellen herzustellen, wie sie z. B. Tesla in seinen Fahrzeugen einsetzt. Dabei geht es darum, die Produktionsraten solcher Batterien zu erhöhen und gleichzeitig den elektrischen Widerstand der so hergestellten Batteriezellen deutlich abzusenken.

Bei der Produktion von Batterien für automobiler Anwendungen handelt es sich um Hochdurchsatzprozesse mit kurzen Zykluszeiten. Gerade deshalb ist eine detaillierte Qualitätskontrolle von existenzieller Bedeutung. Off-spec-Raten müssen im ppm-Bereich liegen und jede Zelle muss bezüglich eingesetzter Materialien rückverfolgbar sein. Derartige Themen werden im Projekt DigiBattPro erforscht. Dennoch kann es immer wieder zu Inhomogenitäten in einzelnen Batterien kommen. Wie viel davon erlaubt oder eben nicht erlaubt werden kann, das klären die ZSW-ForscherInnen im Projekt GRadiBatt.

SCHNELLADUNG OPTIMIEREN

Ein weiteres Projekt am ZSW befasst sich mit einer Verbesserung der Schnellladefähigkeit von Batterien. Hierdurch soll erreicht werden, dass Batterien in weniger als zehn Minuten geladen werden können (Projekt Structure.e). Bei der Fragestellung der Schnellladefähigkeit sind rasche Fortschritte notwendig, um den Aufbau der Ladeinfrastruktur in die richtige Richtung zu lenken: Es geht um nicht mehr oder weniger als die Frage, ob für Elektrofahrzeuge in Deutschland zukünftig mehrere Millionen individuelle Wallboxen notwendig werden oder eine Transformation des Tankstellennetzes mit nur 14.000 Stationen in Schnelladeparks ausreichend sein wird.

For this purpose, the electrode is dry extruded, processed and finished within the cell in a single step. ZSW has installed the required extruders and will now develop this technology into a proof of concept.

POTENTIALS IN PRODUCTION

ZSW is also researching potential improvements related to the mechanical production of batteries. The researchers are investigating the relationship between the final performance of a battery and the individual production steps. In the Rollbatt project, ZSW researchers are trying to produce improved round cells, such as those used by Tesla in its vehicles. The aim is to increase the production rates of such batteries and at the same time significantly lower the electrical resistance of the battery cells produced in this way.

Manufacturing batteries for automotive applications is a high-throughput process with short cycle times. This is precisely why detailed quality control is of existential importance. Off-spec rates must be in the ppm range and each cell must be traceable with regard to the materials used. These kinds of issues are being researched in the DigiBattPro project. Nevertheless, there can always be inhomogeneities in individual batteries. Within the GRadiBatt project, ZSW researchers are determining how much can or cannot be tolerated.

OPTIMISING FAST CHARGING

Another project at ZSW is concerned with improving the fast-charging capability of batteries. The goal is to create batteries that can be charged in less than 10 minutes (Structure.e project). Rapid progress is needed when it comes to the issue of fast-charging capability in order to steer the development of the charging infrastructure in the right direction: at issue is the question of whether several million individual wall boxes will be necessary for electric vehicles in Germany in the future, or if a transformation of the petrol station network consisting of only 14,000 stations into fast-charging parks will be sufficient.

PERFORMANCE-NACHWEIS UNTER PRODUKTIONSNAHEN BEDINGUNGEN

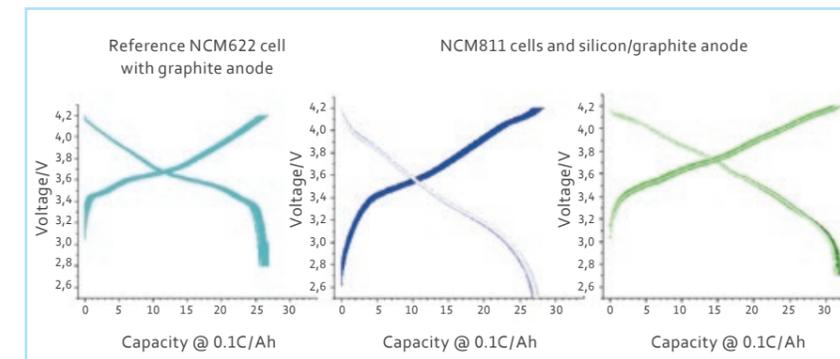
PERFORMANCE VERIFICATION UNDER CLOSE-TO-PRODUCTION CONDITIONS

Als einziges Forschungsinstitut in Deutschland verfügt das ZSW mit der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Batterien (FPL)“ über eine Pilotanlage zur seriennahen Produktion von Batteriezellen in einem Format, wie es auch in batteriebetriebenen Pkw eingesetzt wird. Zahlreiche der vorstehend aufgeführten Entwicklungen werden in Komponenten oder Batteriezell-Designs münden, die dann abschließend auf der FPL ihren finalen Proof of concept erhalten werden.

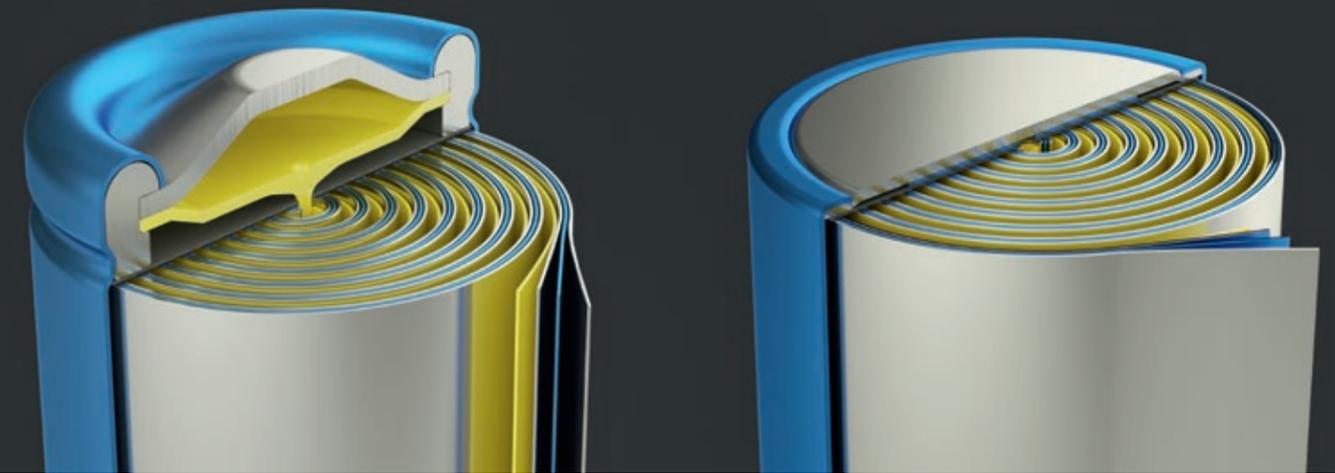
Die FPL ist sehr stark in die deutsche Forschungslandschaft für Batterien und Batteriematerialien integriert und übernimmt den finalen Proof of Concept auch für Entwicklungen, welche an anderen Universitäten oder Forschungseinrichtungen laufen. Aktuell erfährt die FPL im Rahmen des Projektes ZellkoBatt ein technisches Upgrade und wird für alternative Zellformate wie Pouchzellen oder gestapelte prismatische Zellen ertüchtigt. Insbesondere das hochpräzise und schnelle Stapeln einzelner Elektroden- und Separatorlagen stellt die Entwickler der FPL vor große Herausforderungen, die sie im Projekt STACK aktuell angehen. Mit dem Ergebnis aus diesem Projekt können auf der umgebauten FPL dann alle derzeit gängigen automobilen Batterieformate dargestellt werden.

With the “Research Platform for the Industrial Production of Large-Format Lithium-Ion Batteries (FPL)”, ZSW is the only research institute in Germany with a pilot plant for the near-series production of battery cells in a format that is also used in battery-powered passenger cars. Many of the developments listed above will result in components and battery cell designs that will undergo their final proof of concept at FPL.

FPL is very closely integrated into the German research landscape for batteries and battery materials and also handles the final proof of concept for developments that are underway at other universities or research institutions. FPL is currently undergoing a technical upgrade as part of the ZellkoBatt project and will then also be able to produce alternative cell formats such as pouch cells or stacked, prismatic cells. In particular the high-precision and rapid stacking of individual electrode and separator layers poses great challenges for the developers at FPL, a problem they are currently tackling in the STACK project. The result of this project will enable all currently common automotive battery formats to be reproduced on the retrofitted FPL.



// Neue Anoden/Kathodenkombinationen für PHEV-1-Zellen erhöhen die Zellkapazität um über 25%.
 // New anode/cathode combinations for PHEV-1 cells increase cell capacity by more than 25%.



DAS RECYCLING VON LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

RECYCLING LITHIUM-ION BATTERIES

Es ist unbestritten, dass in den letzten zehn Jahren der Schwerpunkt der wissenschaftlichen und industriellen Entwicklung bei Lithium-Ionen-Batterien auf einer Erhöhung der Energiedichte bei gleichzeitiger Senkung der Kosten lag. Mit zunehmendem Erfolg der Elektromobilität und der Massenproduktion der Batterien rückt nun auch die End-of-Life-Diskussion in den Vordergrund.

Diese Diskussion ist getrieben durch gesetzliche Rahmenbedingungen, die abhängig von der jeweiligen Region oder Land eine Recyclingquote von bis zu 80% bei der Verschrottung von (Elektro-)Pkw fordern. Zudem sind die in der Lithium-Ionen-Batterie eingesetzten Materialien viel zu wertvoll, um nicht wiederverwertet zu werden. Obwohl sie keinerlei Edelmetalle enthalten, so sind es doch die schieren Massen an Buntmetallen (Kupfer, Nickel, Kobalt), Aluminium und das Lithium in einer Batterie, welche das Recycling bereits aufgrund dieser Metallwerte lukrativ machen: So enthält eine Tonne nickelhaltiges Gestein aus einer Nickelmine nur ca. 20 kg Nickel. In der Batterie eines Tesla-Model 3 sind hingegen bereits 60 kg Nickel enthalten. Bei einem Batteriegewicht von 500 kg entspricht dies einer fünffachen Anreicherung dieses Metalls im Vergleich zur Mine. Bei Lithium ist dieser Faktor noch viel höher: 6 kg Lithium in einer Batterie ersparen beim erfolgreichen Recycling das Aufarbeiten mehrerer Tausend Kubikmeter an Li-haltiger Salzlösung.

Looking back at the last decade, there is no doubt that the focus of scientific and industrial development in the area of lithium-ion batteries has been on increasing energy density while reducing costs. Now, with the ongoing success of electromobility and the mass production of batteries, the end-of-life discussion is moving to the forefront.

This discussion is driven by legal framework conditions that, depending on the respective region or country, demand a recycling rate of up to 80% when scrapping (electric) cars. Either way, the materials used in the lithium-ion battery are far too valuable not to be recycled. Although they do not contain any precious metals, it is the sheer amount of non-ferrous metals (copper, nickel and cobalt), aluminium and lithium in batteries that makes recycling lucrative: for example, one tonne of nickel-containing rock from a nickel mine contains only about 20 kg of nickel. In contrast, the battery in a Tesla Model 3 contains 60 kg of nickel. With a total battery weight of 500 kg, this is five times the enrichment of that metal compared to the mine. For lithium, this factor is even higher: 6 kg of lithium in a battery means that successful recycling saves the processing of several thousand cubic metres of salt solution containing lithium.

MEHR ALS NUR METALLE ZURÜCKGEWINNEN

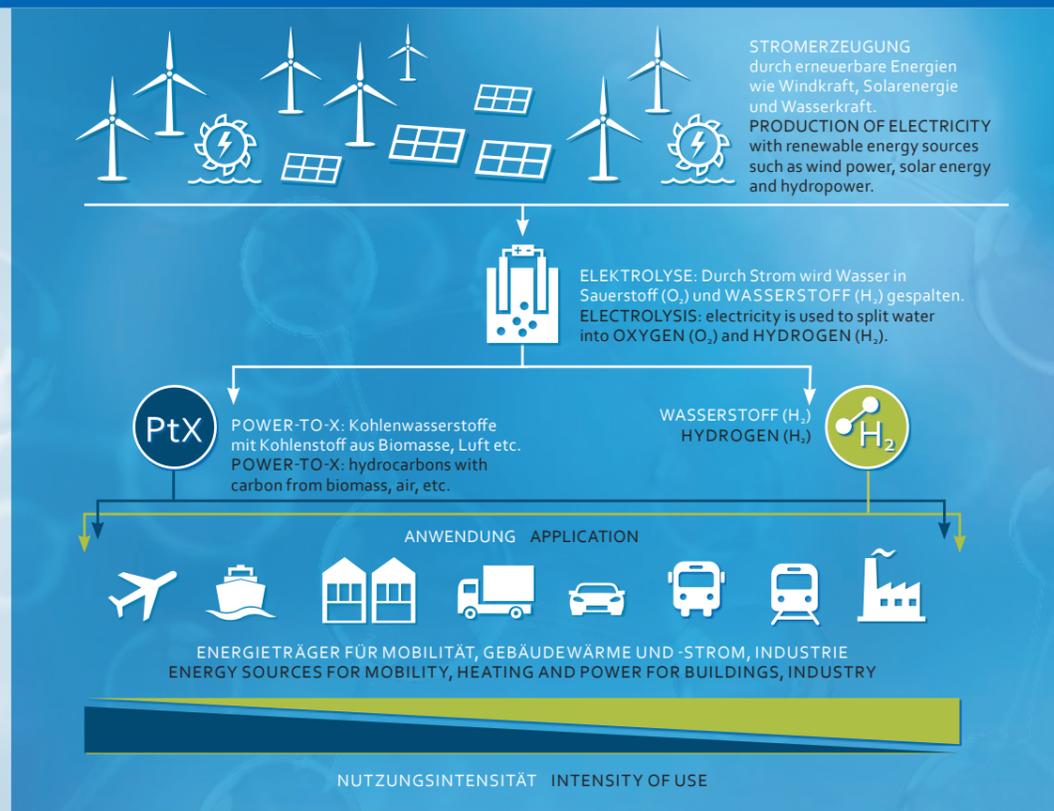
Aktuell werden die wenigen Lithium-Ionen-Batterien, die zum Recycling kommen, in bestehende Anlagen zur Buntmetallrückgewinnung gegeben. Dabei kann ein Großteil der Buntmetalle wie Kobalt, Nickel oder Kupfer zurückgewonnen werden, während das Lithium in der Schlacke dieses Prozesses verloren geht. Da dieser Zustand nicht zufriedenstellend ist und gerade das Lithium unbedingt recycelt werden muss, wurden in den letzten Jahren alternative Szenarien erarbeitet und Verfahren vorentwickelt. So stellt sich der aktuell am intensivsten beforschte Prozess wie folgt dar: Die Batterien werden dezentral gesammelt, tiefentladen und dann teilautomatisiert in Module und Zellen zerlegt. Dabei können Gehäuseteile und Kabel bereits sortenrein gesammelt werden. Die Zellen werden dann mechanisch unter Stickstoff zerkleinert und die Separator-, Kupfer- und Aluminiumfolien über Verfahren der Windsichtung abgetrennt. Es verbleibt ein sogenanntes „Schwarzes Pulver“, also eine Mischung aus Kathoden- und Anodenmaterial sowie Elektrolyt.

Mittels Vakuumbehandlung bei höherer Temperatur kann der Elektrolyt entzogen werden. Das trockene Schwarze Pulver wird dann nasschemisch weiter aufgearbeitet. Dabei wird es zuerst in Schwefelsäure aufgelöst und danach werden die Metalle einzeln abfraktioniert. Für Nickel und Kobalt können dabei bereits heute Recyclingraten von > 85% erreicht werden, während dieser Wert bei Lithium aktuell eher um 70% liegt. Als problematisch stellen sich Spuren von Fluor heraus, die über das Li-haltige Leitsalz und diverse Binder beim Bau der Batterie in die Zelle gelangen. Fluor und fluorhaltige Verbindungen lassen sich im Recyclingprozess nur schwer abtrennen und schleppen sich durch alle Prozessstufen, was der Reinheit der zu gewinnenden Metalle nicht förderlich ist. Im Projekt RecycleBatt, das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg gefördert wird, versucht das ZSW einen anderen Recyclingweg zu bewerten, bei dem aus dem Schwarzen Pulver heraus direkt die Anoden- und Kathodenmaterialien zurückgewonnen werden sollen, die dann in weniger anspruchsvollen Batterien wie z. B. in der stationären Stromspeicherung, direkt wieder verbaut werden können.

MORE THAN JUST RECOVERING METALS

At present, the few lithium-ion batteries that are recycled are sent to existing plants to recover their non-ferrous metals. During this process, a large portion of the non-ferrous metals such as cobalt, nickel or copper can be recovered, while the lithium is lost in the slag. Since the situation is not satisfactory and the lithium especially needs to be recycled, alternative scenarios have been devised and a number of processes have been pre-developed in recent years. The now most intensively researched process is as follows: the batteries are collected decentrally, deep discharged and then semi-automatically dismantled into modules and cells. Housing components and cables can already be collected separately. The cells are then mechanically crushed in a nitrogen atmosphere and the separator, copper and aluminium foils are separated using an air separation processes. What remains is a so-called "black powder", that is a mixture of cathode and anode material as well as electrolyte.

The electrolyte can be removed by vacuum treatment at a higher temperature. The dry black powder is then processed further using a wet chemical process. It is first dissolved in sulphuric acid and then the metals are individually fractionated. Recycling rates of > 85% can already be achieved for nickel and cobalt, while this value is currently closer to 70% for lithium. One problem is that traces of fluorine enter the cell via the lithium-containing conducting salt and various binders during battery construction. Fluorine and fluorine-containing compounds are difficult to eliminate during the recycling process and remain through all process stages, affecting the purity of the metals being recovered. In the RecycleBatt project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, ZSW is trying to evaluate a different recycling route whereby the anode and cathode materials are recovered directly from the black powder to then be directly reused in less demanding batteries such as those used for stationary electricity storage.



Brennstoffzellenfahrzeuge bieten lange Reichweiten und kurze Betankungszeiten, wie sie von batteriebetriebenen Fahrzeugen heute nicht erreicht werden. Sie fahren ebenfalls völlig emissionsfrei und in Abhängigkeit von der Quelle des eingesetzten Wasserstoffs ist sogar eine völlige CO₂-Neutralität darstellbar.

Fuel cell vehicles offer long ranges and short refuelling times that are currently unmatched by battery-powered vehicles. They also run entirely emission-free and, depending on the source of the hydrogen used, full CO₂ neutrality is actually possible.

GRÜNER WASSERSTOFF UND GRÜNE KOHLENWASSERSTOFFE
Wasserstoff wird zukünftig ein Hauptenergieträger werden und somit auch in der Fläche zur Verfügung stehen. Nachteilig bei dem Einsatz von Wasserstoff im Vergleich zur batterieelektrischen Mobilität sind die Effizienzverluste bei der Erzeugung und Kompression des Wasserstoffs wie auch der im Vergleich zur Batterie geringere Wirkungsgrad der Brennstoffzelle im Fahrzeug. Sind jedoch große Reichweiten und kurze Betankungszeiten zwingend notwendig, wie z. B. im Schwerlastverkehr, dann stellen Brennstoffzellen eine valide Alternative für heutige Verbrennungsmotoren dar.

GREEN HYDROGEN AND GREEN HYDROCARBONS
Hydrogen will become a major energy carrier in the future and will therefore also be available on a large scale. The disadvantages of hydrogen in comparison to battery-electric mobility are the efficiency losses during the production and compression of hydrogen as well as the lower efficiency of the installed fuel cell compared to the battery. However if long ranges and short refuelling times are absolutely necessary, such as in heavy-duty traffic, then fuel cells are a valid alternative to today's internal combustion engines.

Flüssige Biokraftstoffe wie Biodiesel oder Bioethanol haben als Zudosierung für Diesel oder Benzin im Umfang von 5–10% bereits Eingang in den Alltag gefunden. Jedoch sind derartige Kraftstoffe vor allem aufgrund des Einsatzes von Mineräldüngern bei der Aufzucht der Energiepflanzen (Mais, Zuckerrüben, Zuckerrohr etc.) nicht als CO₂-neutral einzustufen.

Liquid biofuels such as biodiesel or bioethanol have already found their way into everyday life as additives for diesel or petrol in the range of 5–10%. However, such fuels cannot be classified as CO₂-neutral, mainly because of the use of mineral fertilisers in the cultivation of energy crops (maize, sugar beet, sugar cane, etc.).

Weiterhin in der Entwicklung sind sogenannte Power-to-X-(PtX-) Kraftstoffe. Diese sog. eFuels, also z. B. Methan, Diesel oder Kerosin auf Basis von CO₂ und aus erneuerbarem Strom mittels Elektrolyse hergestelltem „grünem“ Wasserstoff können in solchen Bereichen zum Einsatz kommen, die nicht vollständig elektrifizierbar sind oder in denen Wasserstoff nicht direkt genutzt werden kann. Das sind z. B. Kraftstoffe für den Flug-, Schiffs- und Bahnverkehr. PtX-Prozesse können außerdem Rohstoffe für die chemische Industrie erzeugen oder als saisonaler Energiespeicher eingesetzt werden.

Power-to-X (PtX) fuels are still being developed. These so-called eFuels, for example methane, diesel or kerosene are produced on the basis of CO₂ and "green" hydrogen generated from renewable electricity by means of electrolysis. They can be used in areas that cannot be fully electrified or where hydrogen cannot be used directly, for example fuels for aviation, shipping and rail transport. PtX processes can also produce raw materials for the chemical industry or be used as seasonal energy storage systems.

Für die Kohlenwasserstoffsynthese bedarf es neben Wasserstoff auch Kohlenstoff in Form von CO₂, das bevorzugt aus regenerativen Punktquellen (z. B. Biogas- oder Bioethanolanlagen) entnommen, künftig aber zur Bereitstellung großer CO₂-Mengen auch aus der Luft gewonnen werden muss. Nur dann können derartige PtX-Kraftstoffe auch als CO₂-neutral eingestuft werden. Als eine günstige Überbrückungsstrategie bis zur Verfügbarkeit technisch ausgereifter Verfahren zur großskaligen CO₂-Gewinnung aus der Luft kann dabei auch die Nutzung von hochkonzentrierten CO₂-Strömen aus der Industrie in Betracht gezogen werden. So wird z. B. bereits

In addition to hydrogen hydrocarbon synthesis also requires carbon in the form of CO₂, which is preferably taken from regenerative point sources (for example, biogas or bioethanol plants), but in the future will also have to be extracted from the air to provide larger quantities of CO₂. Only then could such PtX fuels be classified as CO₂-neutral. Using highly concentrated CO₂ streams from the industry could also be considered as a favourable bridging strategy until technically mature processes for large-scale CO₂ extraction from the air are available. For example, the conversion of CO₂ from the exhaust gases of the

WIRD ES BEI DER LITHIUM-IONEN-BATTERIE BLEIBEN?

WILL THE LITHIUM-ION BATTERY REMAIN?

Diese Frage wird intensiv diskutiert. Einig sind sich Wissenschaft und Industrie dabei, dass die Potenziale dieser Technologie noch lange nicht ausgereizt sind. Weitere Kostensenkungen bei weiter zunehmenden Energieinhalten und verbessertem Kundennutzen (Reichweite im Pkw, Schnellladefähigkeit) werden schon bald realisiert sein. Das vollständige Recycling der Batterien sowie der Verzicht auf Kobalt und die Reduktion des Nickelgehalts werden den Vorsprung dieser Batterietechnologie weiter erhöhen.

This question is the subject of intense debate. Science and industry both agree that the potential of this technology is still far from exhausted. Further cost reductions and improved energy content and customer benefits (range and fast-charging capability) will soon be realised. Recycling the batteries in full, dispensing with cobalt and reducing the nickel content will further sharpen the competitive edge of this battery technology.

Letztendlich kann nur die verfügbare Menge an kostengünstigem Lithium den Einsatzbereich dieser Batterie limitieren. Deshalb ist die frühzeitige Suche nach alternativen Batteriesystemen ohne Lithium eine Pflicht und auch das ZSW ist mit dem Projekt TRANSITION daran beteiligt. In diesem Projekt soll Natrium an Stelle des Lithiums als aktive Batteriekomponente treten, da Natrium in der Natur quasi unbegrenzt verfügbar ist – z. B. als Teil des Meersalzes. Aber auch Batterien auf Basis von Magnesium oder Kalzium werden am ZSW innerhalb des Exzellenzclusters für Post-Lithium-Batterien POLiS beforscht.

Ultimately, only the available amount of low-cost lithium could limit this battery's range of application. Therefore a timely search for alternative battery systems without lithium is imperative, and ZSW is actively involved with the search in the TRANSITION project. The project seeks to replace lithium with sodium as the active battery component, since sodium is available in nature in virtually unlimited quantities – for example, in sea salt. Batteries based on magnesium or calcium are also being researched at ZSW within the POLiS (Post-Lithium Storage) Cluster of Excellence.

EIN BLICK AUF DIE ALTERNATIVEN

Der politisch bedingte Wille zum Erfolg der Elektromobilität auf Basis von Lithium-Ionen-Batterien in China hat andere alternative Antriebstechniken mit CO₂-Reduktionspotenzial in den Hintergrund treten lassen. Hierzu zählen der in der Vergangenheit in Europa teilweise massiv geförderte Einsatz von Erdgas oder LPG als Kraftstoff oder Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit komprimiertem Wasserstoff betrieben werden. Während Erdgas als Kraftstoff heute keine Zukunft mehr eingeräumt wird, erleben Brennstoffzellen gerade eine Renaissance.

A LOOK AT THE ALTERNATIVES

The politically driven support in China for electromobility based on lithium-ion batteries has sidelined other alternative drive technologies with CO₂-reduction potential. These include natural gas or LPG as fuel, which have been massively funded in Europe in the past, or fuel cell vehicles that run on compressed hydrogen. While natural gas as a fuel is no longer considered to have a future, fuel cells are currently experiencing a renaissance.

in Pilotprojekten die Umsetzung von CO₂ aus den Abgasen der Zementindustrie mit Elektrolyse-Wasserstoff zu Flugbenzin untersucht. Mit solchen Prozessen lässt sich in einer Übergangszeit emittiertes CO₂ quasi nochmals verwerten und somit auch eine merkliche Reduktion der gesamten Emissionen erzielen.

cement industry using electrolysis-sourced hydrogen to produce aviation fuel is already being investigated in pilot projects. With such processes, CO₂ emitted during a transitional period could effectively be recycled again and thus also bring about a noticeable reduction in overall emissions.

DER KREIS SCHLIESST SICH UND ERÖFFNET PERSPEKTIVEN THE CIRCLE CLOSES AND OPENS UP NEW PERSPECTIVES

Lithium-Ionen-Batterien sind ein Schlüssel für die zukünftige Mobilität ohne Emissionen. Bereits heute ist ersichtlich, dass sie das tragende Antriebskonzept im Pkw-Bereich sein werden. Das zeigte sich nicht zuletzt in der zweiten Jahreshälfte 2020 in einer rasanten Zunahme der Zulassungszahlen an Elektrofahrzeugen. Bei dieser Entwicklung mitten im Covid-19-Jahr 2020 hat auch die Bundesregierung mit ihrer Subventionspolitik in Höhe von bis zu 9.000 Euro je Elektro-Pkw ein starkes Zeichen gesetzt, was dazu geführt hat, dass sich die Zahl der neu zugelassenen Elektro-Pkw insbesondere in der zweiten Jahreshälfte 2020 stark erhöht hat. So wurden im Gesamtjahr 2020 in Deutschland fast 200.000 Fahrzeuge mit ausschließlichem Batterieantrieb (BEV) oder mit einer Kombination aus großer Batterie und Verbrennungsmotor (PHEV) verkauft – ein Plus von 200 % im Vergleich zum Vorjahr. Dieses Plus fällt noch eindrücklicher aus, wenn man gleichzeitig den Rückgang der Zulassungszahlen für Benzin- (-36 %) und Dieselfahrzeuge (-29 %) in die Rechnung einbezieht. Eine Verlängerung der staatlichen Kaufprämie, eine zunehmende Anzahl an Fahrzeugmodellen, ein dichteres Netz an Ladesäulen sowie eine weitere Reduktion der Batteriekosten werden den Markthochlauf dieser Technologie weiter beschleunigen. Zudem üben die anspruchsvollen CO₂-Ziele der EU (95 g/km im Jahr 2020) mit den hiermit verbundenen hohen Strafzahlungen bei Nichterfüllung Druck auf die Automobilproduzenten aus. Und noch ein Rekord wurde im Covid-19-Jahr 2020 in Europa aufgestellt: Erstmals wurden mit 1,37 Mio. batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV und PHEV) mehr Zulassungen verzeichnet als in der Volksrepublik China mit 1,25 Mio. Elektrofahrzeugen.

EIN BLICK IN DIE ZUKUNFT

Für die nächsten zehn Jahre lassen sich die folgenden drei Entwicklungen vorhersehen:

- 1) Die Lithium-Ionen-Batterien werden billiger und in ihrer Performance noch besser werden. Dies führt zu längeren Reichweiten der Pkw, geringeren Anschaffungskosten und verbesserter Schnellladefähigkeit.
- 2) Das Batterierecycling wird etabliert sein und hohe Wiedergewinnungsraten ermöglichen. Hiermit wird der Druck auf die natürlichen Ressourcen reduziert und auch die CO₂-Bilanz bei der Batterieherstellung deutlich verbessert.
- 3) Stromerzeugung wird noch regenerativer und somit CO₂-ärmer werden.

Lithium-ion batteries are a key to future emission-free mobility. It is already clear that they will be the main drive concept in the passenger car sector. This was already evident in the rapid increase in the number of new electric vehicle registrations in the second half of 2020. In the midst of this development in the COVID-19 year 2020, the German government sent a strong signal with its subsidy policy of up to 9,000 euros per electric car which has led to a sharp rise in the number of newly registered electric cars especially in the second half of 2020. In the whole of 2020, for example, almost 200,000 vehicles with battery-only drive systems (BEV) or with a combination of large battery and combustion engine (PHEV) were sold in Germany – an increase of 200% compared to the previous year. This increase is all the more impressive when taking into account the decline in registrations of petrol (-36%) and diesel (-29%) vehicles. An extension of the government purchase premium, an increasing number of vehicle models, a denser network of charging stations and a further reduction in battery costs will all further accelerate the market ramp-up of this technology. Moreover, the EU's ambitious CO₂ targets (95 g/km in 2020) and the associated high penalties for non-compliance are putting pressure on car manufacturers. And yet another record was set in Europe in the COVID-19 year 2020: for the first time 1.37 million battery electric vehicles (BEV and PHEV) were registered, more than in the People's Republic of China with 1.25 million electric vehicles.

A LOOK INTO THE FUTURE

The following three developments can be predicted for the next ten years:

- 1) Lithium-ion batteries will become cheaper and perform even better. This will lead to longer car ranges, lower purchase costs and improved fast-charging capabilities.
- 2) Battery recycling will be well established, making high recovery rates possible. This will reduce pressure on natural resources and significantly improve the carbon footprint of battery production.
- 3) Power generation will become even more renewable and therefore less carbon-intensive.



Es ist gut, dass alle diese Prozesse parallel verlaufen, da nur durch deren Kombination eine optimale Reduktion der CO₂-Emissionen erzielt werden kann.

Wie bei vielen neuen Technologien waren die ersten zehn Jahre der Kommerzialisierung von Elektrofahrzeugen (2010–2020) eher schleppend, aber es werden sehr viel dynamischere Jahre folgen. Der Green Deal der EU, das angekündigte „Verbrenner-Aus“ in zahlreichen Ländern und hohe Strafen auf zu hohe CO₂-Emissionen in der Neuwagenflotte werden die Marktdurchdringung von batteriebetriebenen Pkw antreiben. Brennstoffzellenantriebe im Schwerlastbereich und ggf. flüssige eFuels im Luftverkehr haben das Potenzial, sich außerhalb der Batterien merkliche Marktanteile bei zukünftigen Antrieben zu sichern.

Das ZSW ist mit seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, seinen Anlagen und seinen Forschungsprojekten im Zentrum dieser dynamischen Entwicklungen unterwegs. Die Arbeiten des ZSW, von denen in diesem Fokus-Bericht nur einige öffentlich geförderte Projekte genannt sind und nicht die zahlreichen direkten Kooperationen mit Industriepartnern, werden ihren Anteil am Erfolg der Lithium-Ionen-Batterie haben. Das zähe Forschen von drei Wissenschaftlern, das seine Belohnung im Nobelpreis 2019 fand, der Mut der Firma Sony im Jahr 1990, diese Batterie zu kommerzialisieren, und das Risiko einiger Autohersteller, bereits früh erste Fahrzeuge mit dieser Batterie anzubieten, haben den Erfolg der Lithium-Ionen-Batterien eingeleitet. Die stetige Verbesserung dieses Batterietyps, die noch für viele Jahre weitergehen wird, lässt die Aussage zu, dass mit der Lithium-Ionen-Batterie eine der wichtigsten technischen Lösungen für eine CO₂-freie Mobilität zur Verfügung steht.

It is fortunate that these are all parallel processes, since an optimal reduction of CO₂ emissions can only be achieved by combining all of them.

As with many new technologies the first ten years of electric vehicle commercialisation (2010-2020) were rather slow, but now far more dynamic years will follow. The EU's Green Deal, the announced "internal combustion phase-out" in many countries and high penalties on excessive CO₂ emissions from new car fleets will help drive the market penetration of battery-powered passenger cars. Fuel cell drives in the heavy-duty sector and possibly liquid eFuels in aviation have the potential to secure noticeable market shares besides batteries in future drives.

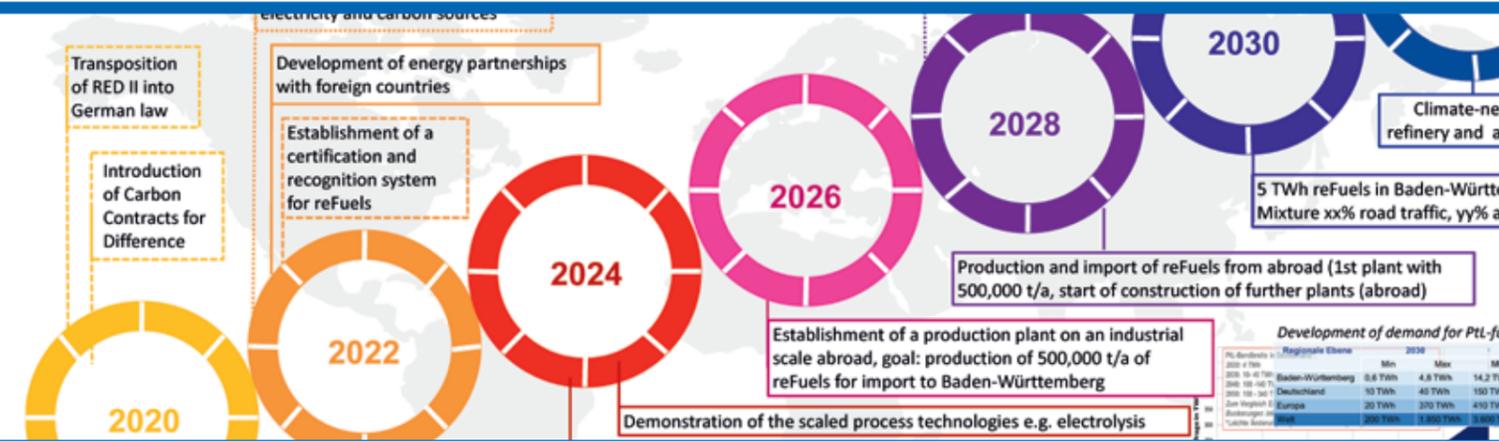
With its staff, its facilities and its research projects, ZSW is at the centre of these dynamic developments. The work carried out by ZSW, described via a selection of publicly funded projects in this Focus Report, is also supported by numerous direct collaborations with industry partners and contributes to the success story of the lithium-ion battery. The tenacious research effort of three scientists, which culminated in the 2019 Nobel Prize, Sony's courage in commercialising this battery type in 1990 and the risk taken by some car manufacturers to offer the first vehicles with this battery type at an early stage have all ushered in the success of lithium-ion batteries. The ongoing improvement of this type of battery will continue for many more years securing the role of the lithium-ion battery as one of the most important technical solutions for CO₂-free mobility.

// Fachgebiete und
Projekte

// Departments and
Research Projects



// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)



// Eine Roadmap für reFuels für Baden-Württemberg.
// A roadmap for reFuels for Baden-Württemberg.

// Unsere Kernkompetenzen

Mit der Formulierung des Ziels, Europa bis spätestens 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu entwickeln, der daraus resultierenden deutlichen „Ambitionierung“ des europäischen Treibhausgasminderungsziels für 2030 von -40% auf -55% gegenüber 1990, dem Europäischen Green Deal und einem europäischen Klimaschutzgesetz will die EU der Klimakrise aktiv entgegenzutreten. Damit eröffnen sich dem Fachgebiet Systemanalyse neue Spielräume, Gestaltungsmöglichkeiten und Betätigungsfelder gerade auch in der Zusammenarbeit mit den anderen Fachgebieten des ZSW.

So kann die strategische Systemanalyse als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik parallel zur Technologieentwicklung am ZSW deren Marktchancen bewerten, die internationale Wettbewerbsposition ausloten und Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzpotenziale analysieren. Darauf basierend kann die Politikberatung Hemmnisse aufzeigen, Lösungsräume ausloten und neue, wirkungsvolle Instrumente zur Unterstützung von Markteintritt oder Markthochlauf für die jeweiligen Technologien entwickeln. Grüner Wasserstoff, seine Erzeugung, mögliche Anwendungen und Folgeprodukte wie synthetische Kraftstoffe sind hier sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene stark in den Vordergrund gerückt.

Das Team „Simulation und Optimierung“ nutzt zudem Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens, um in den verschiedensten für die Energiewende relevanten Anwendungsfeldern Effizienzgewinne und Prozessoptimierungen zu erreichen. Zudem wird das Know-how genutzt, um neue Produkte wie technische Systeme zur Erkennung windenergiegefährdeter Vogelarten zu entwickeln.

Das Team „Windenergie“ arbeitet zusammen mit dem Forschungscluster WindForS intensiv am Aufbau und der Inbetriebnahme des weltweit ersten Windenergieforschungstestfelds in bergig-komplexem Gelände, um die Energiewende auf dieser Ebene durch anwendungsnahe Forschung voranzubringen.

// Our main focus

In order to actively counter the climate crisis, the European Union set the goal for Europe to become the first climate-neutral continent by 2050 at the latest, necessitating an ambitious increase of the European greenhouse gas reduction target from -40% to -55% for 2030 compared to 1990, as part of the European Green Deal and the proposed European climate protection law. This opens up new opportunities and fields of activity for the Systems Analysis department, especially in cooperation with other ZSW departments.

For example the Strategic Systems Analysis team, as an interface between science and politics, can evaluate market opportunities for technology developed at ZSW, sound out the international competitive position and analyse the potential for value and job creation. On that basis, consultancy for policymakers can help point out obstacles, sound out possible solutions and develop new, effective instruments to support market entry and ramp-up the respective technologies. Green hydrogen, its production, possible applications and downstream products such as synthetic fuels have moved to the fore in this regard, both at federal and state levels.

The “Simulation and Optimisation” (SimOpt) team uses methods from the field of machine learning to bring about efficiency gains and process optimisations in a wide range of application areas relevant to the energy transition. Furthermore, expertise is also applied to the development of new products such as technological systems to detect bird species at risk from wind turbines.

The Wind Energy team is working closely together with the WindForS research cluster to build and commission the world’s first wind energy research test site in mountainous and complex terrain in order to advance the energy transition at this level through application-oriented research.

// Entwicklung einer Roadmap für reFuels für Baden-Württemberg

Mit der Klimaneutralität bis spätestens 2050 wird auf europäischer Ebene ein neues Anforderungsniveau verankert, das jetzt auch signifikante Transformationsanforderungen an Sektoren stellt, die bei den bislang verfolgten schwächeren Reduktionspfaden nicht im Fokus standen. Das ist neben der energieintensiven Grundstoffindustrie (Chemieindustrie, Mineralölwirtschaft) vor allem der Verkehr: Auch der Luftverkehr, die internationale Seeschifffahrt und die nicht elektrifizierbaren Teile des Güterverkehrs müssen nunmehr klimaneutral werden.

Vor diesem Hintergrund entwickeln sich klimaneutrale strombasierte synthetische Kraftstoffe – sog. reFuels – zu einem entscheidenden Baustein. Baden-Württemberg kann von einem Markthochlauf von reFuels erheblich profitieren, wenn über Energiepartnerschaften der Import von synthetischem, klimaneutralem Rohölersatz oder ähnlichen Vorprodukten und Rohstoffen der Fortbestand der gewachsenen Industrie- und Energieinfrastrukturen über die Transformation zur Klimaneutralität gesichert wird. Gleichzeitig können für den Industrieanlagen- und Maschinenbau über Export von Produktionstechnologien und deren Komponenten neue Absatzoptionen erschlossen werden. Dies konnte in umfangreichen Begleituntersuchungen zum Projekt „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg nachgewiesen werden. Um die nächsten Schritte stringent einzuleiten, wurde eine Roadmap für reFuels für Baden-Württemberg entwickelt (s. Abb. oben). Sie zeigt die erforderlichen Aktivitäten in puncto rechtlicher Rahmen, Demonstrationsprojekte, Technologieskalierung und Energiepartnerschaften auch auf der Zeitskala und umreißt die zu ergreifenden Maßnahmen. Ziel ist die Realisierung von Wertschöpfungspotenzialen in Baden-Württemberg bei einem gleichzeitigen Erreichen des Klimaschutzziels 2030.

// Development of a reFuels roadmap for Baden-Württemberg

With climate neutrality to be achieved by 2050 at the latest, a new level of requirements is being anchored at the European level, imposing significant transformation requirements on sectors that were not the focus of the less stringent reduction paths pursued so far. In addition to the energy-intensive raw materials industry (the chemical and mineral oil industries), this is above all transport: air transport, international shipping and the non-electrified parts of freight transport must now also become climate-neutral.

Against this background, climate-neutral electricity-based synthetic fuels – so-called reFuels – are becoming a decisive building block in the future energy system. Baden-Württemberg stands to benefit considerably from a market ramp-up of reFuels if the import of synthetic, climate-neutral crude oil substitutes or similar primary products and raw materials is secured via energy partnerships to ensure the continued existence of the established industrial and energy infrastructures during the transformation towards climate neutrality. At the same time, new sales opportunities can be created for the industrial and mechanical systems engineering sector through the export of production technologies and their components. This has been demonstrated by extensive accompanying studies carried out for the “reFuels – rethinking fuels” project on behalf of the Baden-Württemberg Ministry of Transport. A reFuels roadmap was devised for Baden-Württemberg in order to consistently initiate the next steps (see fig. above). It presents the necessary activities in terms of legal framework, demonstration projects, technology scaling and energy partnerships, including a time scale, and it outlines the measures to be taken. The goal is to realise value creation potential in Baden-Württemberg while simultaneously achieving the 2030 climate protection target.



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

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

“Green hydrogen has the potential to be a ‘game changer’ – it opens up the possibility of guiding industrial societies towards climate neutrality in a value-preserving way, while at the same time offering sustainable value creation potential and future prospects for developing countries.”

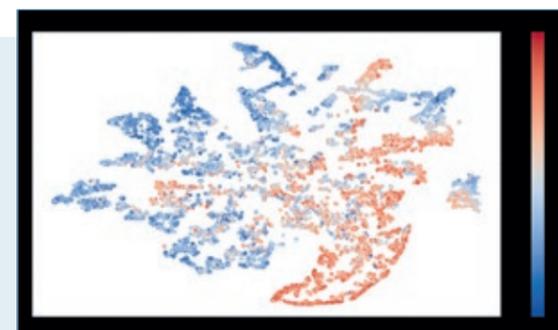
// Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt
E-mail: maike.schmidt@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-232



// Regionales KI-Lab für Erneuerbare Energien (KILEE)

Mit dem Projekt „Regionales KI-Lab für Erneuerbare Energien (KILEE)“ unterstützen die ZSW-WissenschaftlerInnen Firmen aus Baden-Württemberg, vorzugsweise kleine und mittlere Unternehmen, mit der Möglichkeit, Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) und insbesondere des Maschinellen Lernens (ML) anzuwenden und hiermit neue Produktionsprozesse, Produkte und Dienstleistungen im Kontext der Energiewende zu entwickeln und zu optimieren. Das Projekt wird gefördert im Rahmen der Initiative Wirtschaft 4.0 des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg. Hierfür entwickelten die ZSW-WissenschaftlerInnen des Teams SimOpt ein vollständig automatisiertes ML-Framework. Dies ermöglicht das einfache Hochladen von Datensätzen für die jeweilige Modellierung über ein Web-Frontend. Damit ist ein Einstieg für die teilnehmenden Firmen auch ohne Vorkenntnisse in ML möglich. Über das Web-Frontend können je nach Datensatz und Fragestellung unterschiedliche Optimierungsansätze und -methoden ausgewählt werden. Das SimOpt-Team unterstützt hier jeweils bei der Auswahl der geeigneten Methodik. Zur Modellierung der Daten stehen alle modernen Modelltypen von „Gauß-Prozessen“ bis „Tiefe Neuronale Netze“ zur Verfügung. Die Metaparameter werden zusätzlich durch Mehrfachtraining mit Reinforcement Learning optimiert. Es steht eine vollautomatisierte ML-Kette von der automatischen Datenvorprozessierung über das Training bis zur Auswertung der Sensitivitäten und Importance-Werte der Input-Variablen zur Verfügung.

Ein Anwendungsbeispiel stellt die Optimierung von Wettermodell-basierten Ensemble-Prognosen für die Photovoltaikleistung dar. Hier wurde ein Modell zur optimierten Gewichtung der Anteile der verwendeten Einzel-Wettermodelle an der Ensemble-Leistungsprognose entwickelt. Da die Prognosegüte der Einzelmodelle stark mit der Witterung korreliert, nimmt das Modell eine witterungs-abhängige Gewichtung vor, die die Ensemble-Prognosegüte gegenüber der üblichen Durchschnittsbildung deutlich verbessert (s. Abb.).



// Zweidimensionale Darstellung (t-SNE) zur Gruppierung von Wettermodell-Prognosen mit verschiedenen Gewichtungen in unterschiedlichen Tagessituationen. Die Gewichtungen wurden hier nach einem der lernbaren Eingangsparameter eingefärbt (Azimuth, horizontaler Sonnenwinkel).
 // Two-dimensional representation (t-SNE) of the grouping of weather model forecasts with different weightings in different daily situations. These weightings were coloured according to one of the learnable input parameters (azimuth, horizontal sun angle).

// Dr. rer. nat. Frank Sehnke
 E-mail: frank.sehnke@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-303

// Regional AI Lab for Renewable Energies (KILEE)

With the “Regional AI Lab for Renewable Energies (KILEE)” project, ZSW researchers are supporting companies from Baden-Württemberg, preferably small- and medium-sized enterprises, providing the opportunity to apply methods of artificial intelligence (AI) and in particular machine learning (ML) to develop and optimise new production processes, products and services in the context of the energy transition. The project is funded as part of the Economy 4.0 initiative of the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs. ZSW scientists from the SimOpt team developed a fully automated ML framework for this very purpose. This makes it easy to upload data sets for the respective modelling via a browser-based internet application (“web front end”). Even companies without any ML expertise can easily get started thanks to this application. Depending on the data set and the problem, different optimisation approaches and methods can be selected via the web front end. The SimOpt team offers support in selecting the appropriate method. All modern model types from “Gaussian processes” to “deep neural networks” are available to model the data. The meta parameters are further optimised with multiple training runs using reinforcement learning. A fully automated ML chain is provided, from automatic data pre-processing to training and evaluation of the sensitivities and importance values of the input variables.

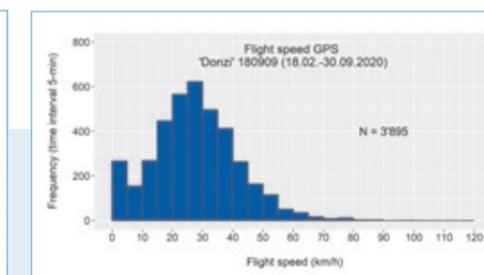
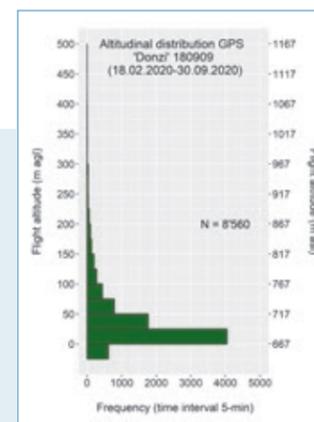
One application example is the optimisation of weather model-based ensemble forecasting for photovoltaic power. A model was developed to optimise the weighting of the shares of the individual weather models used for the ensemble power forecast. Since the forecast quality of the individual models correlates strongly with the weather, the model applies a weather-dependent weighting that significantly improves the ensemble forecast quality compared to the more commonly used averaging (see fig. below).



// NatForWINSSENT – Naturschutzforschung im Windenergie-testfeld

Das Forschungstestfeld des Windenergie-Forschungsclusters Süddeutschland (WindForS), für dessen Aufbau und Betrieb das ZSW verantwortlich ist, hat im Jahr 2020 seine entscheidende Hürde genommen: Seit Juni liegt die Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz vor. Die Bauarbeiten haben damit Fahrt aufgenommen und im Herbst 2021 sollen sich nun die Rotoren der beiden Forschungswindenergieanlagen drehen, um die Optimierung der Windenergienutzung im bergig-komplexen Gelände voranzubringen. Doch die ForscherInnen müssen nicht bis zur Realisierung warten. Schon seit zwei Jahren kann u. a. die umfangreiche Messinfrastruktur der beiden Windmessmasten dazu genutzt werden, wichtige Forschungsfragen zu klären. Erste entsprechende Aufträge konnten bereits angenommen werden. Insbesondere das vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) geförderte Projekt „NatForWINSSENT-II – Umsetzung der Naturschutzforschung am Windenergie-testfeld an Land“ nutzt die Testfeldinfrastruktur seit 2018 umfassend. So konnten bereits bemerkenswerte Erkenntnisse zu den Abhängigkeiten des Flugverhaltens von Vögeln und Fledermäusen von den Wind- und Sichtverhältnissen gewonnen werden.

Ein Beispiel hierfür ist der Rotmilan, der an vielen Standorten im Fokus des vermeintlichen Konflikts zwischen der Windenergienutzung und dem Artenschutz steht. Mithilfe zweier mit GPS-Sendern ausgestatteter Vögel und zahlreicher Flugbahnverfolgungen mit einem Laser-Range-Finder haben Ornithologen in den vergangenen zwei Jahren am Testfeld umfangreiche Flugdaten gesammelt. Auf dieser Grundlage können sie bereits jetzt belastbare Aussagen zu Fluggeschwindigkeiten und -höhen treffen, was für die Entwicklung von Schutzmaßnahmen große Bedeutung hat (s. Abb. unten).



//Verteilung der Flughöhen eines besenderten Rotmilans am Testfeld.
 // Distribution of flight altitudes of a transmitter-equipped red kite at the test site.

//Verteilung der Fluggeschwindigkeiten eines besenderten Rotmilans am Testfeld.
 // Distribution of flight speeds of a transmitter-equipped red kite at the test site.

// Dr. Frank Musiol
 E-mail: frank.musiol@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-217



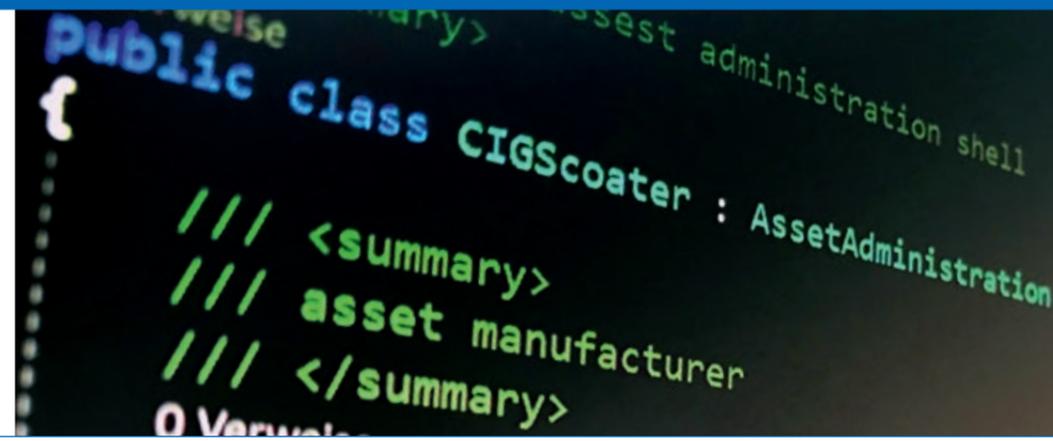
// NatForWINSSENT – Nature conservation research at the wind energy test site

The research test site of the Wind Energy Research Cluster Southern Germany (WindForS), for whose construction and operation ZSW is responsible, cleared a decisive hurdle in 2020: approval under the Federal Immission Control Act was granted in June. Construction work has now picked up speed and in autumn 2021 the rotors of the two research wind turbines should start turning to advance the optimisation of wind energy use in complex mountainous terrain. However, the researchers did not have to wait for construction to be completed. For two years already now, the extensive measurement infrastructure of the two wind measurement masts can be used to answer important research questions, among other things. The first such contracts have already been accepted. In particular the project “NatForWINSSENT-II - Implementation of nature conservation research at the onshore wind energy test site”, funded by the Federal Agency for Nature Conservation (BfN), has been making extensive use of the test site infrastructure since 2018. Remarkable findings have already been obtained on the dependencies of the flight behaviour of birds and bats on wind and visibility conditions.

One example in this respect is the red kite which is the focus of the perceived conflict between wind energy use and species protection at many sites. With the assistance of two birds equipped with GPS transmitters and numerous flights tracked with a laser range finder, ornithologists have collected extensive flight data at the test site over the past two years. On this basis, they can already make reliable statements about flight speeds and altitudes, both of great importance for the development of protection measures for the species (see fig. below).

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)



// Unsere Kernkompetenzen

Bei der Herstellung von Photovoltaikmodulen bietet die Dünnschicht-Technologie ein hohes Potenzial zur Kostensenkung. Die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende CIGS-Technologie hat sich in der industriellen Produktion bewährt.

Im Fachgebiet MAT werden im Technikum CIGS-Module auf Glas mit einer Größe bis 30 x 30 cm² hergestellt und weiterentwickelt. Dabei werden weitgehend Durchlaufprozesse und damit sehr industriennahe Verfahren eingesetzt. Das ermöglicht Verbesserungen an den Prozessen und deren Transfer in die Wirtschaft. Auf flexiblen Substraten wie Polymer- oder Metallfolien entwickeln wir im Rolle-zu-Rolle-Verfahren Prozesse für CIGS-Module, die neue Anwendungspotenziale erschließen.

Mit der neuen anorganisch-organischen Materialklasse der Perovskite werden am ZSW sehr hohe Wirkungsgrade in der Einzelzelle erzielt. Dieses Materialsystem kann zudem aus der Lösung und damit durch kostengünstige Drucktechnologien hergestellt werden. Mit diesen hohen Wirkungsgraden werden durch den Aufbau von Mehrfachzellen wie z. B. CIGS/Perowskit oder Perowskit/Perowskit noch weitere deutliche Steigerungen im Wirkungsgrad möglich.

Alle Weiterentwicklungen an den Materialsystemen werden für das tiefere Verständnis durch unsere Kompetenzen in der optischen, elektrischen und materialanalytischen Analyse begleitet. Auf der Grundlage unserer langjährigen Erfahrungen mit der Entwicklung und Charakterisierung von CIGS-Solarmodulen bearbeiten wir im Kundenauftrag vielfältige materialanalytische Aufgabenstellungen und bieten die optische Charakterisierung von unterschiedlichsten Materialien an.

// Our main focus

Thin-film technology offers great potential for lowering costs when it comes to the manufacture of photovoltaic modules. The CIGS technology based on copper, indium, gallium and selenium has proven to be suitable for industrial production.

CIGS modules on glass with a size of up to 30 x 30 cm² are produced and further developed in the MAT department's technical lab. We mainly employ continuous processes that are very similar to industrial techniques. This allows for process improvements and their transfer to the industry. We develop processes for CIGS modules on flexible substrates such as polymer films or metal foils in a roll-to-roll process, exploring new opportunities for their application.

Very high single-cell efficiencies are achieved at ZSW with the new inorganic-organic perovskite material class. Moreover, this material system can be produced from a solution and therefore with low-cost printing technologies. Further significant increases in efficiency are possible building upon these high efficiencies and applying multiple-junction designs such as CIGS/perovskite or perovskite/perovskite tandems.

All further developments on the material systems are aided by our expertise in optical, electrical and material analytical analyses in order to gain a deeper understanding. Drawing on many years of experience in the development and characterisation of CIGS solar modules, we work on a wide range of material analytical tasks as well as optical material characterisations on behalf of our customers.

// CIGS-Dünnschicht-PV bekommt digitalen Zwilling

Das Land Baden-Württemberg fördert im Rahmen seiner Digitalisierungsstrategie seit 2019 die Forschung an der „selbstlernenden Solarfabrik“. Wesentliche Aspekte der Digitalisierung sind sowohl Verwaltungsschalen – oder auch der „digitale Zwilling“ – von Anlagen als auch die Vorhersage und kontinuierliche Weiterentwicklung von Produkteigenschaften wie z. B. der Effizienz von Solarzellen mithilfe von maschinellem Lernen.

// Selbstlernende Anlagen

Die CIGS-Beschichtung erfolgt in einem thermodynamisch komplexen System, das mit maschinellem Lernen, vorwiegend mit neuronalen Netzen, im ersten Schritt bereits gut modelliert werden kann. Mit solchen Modellen soll es möglich gemacht werden, die beiden wesentlichen Betriebszustände einer CIGS-Beschichtungsanlage – Starten und Beschichten – schneller herbeizuführen und zu stabilisieren (siehe Abb. unten).

// Intelligente Werkzeuge für die Prozessentwicklung

Für die Herstellung einer CIGS-Dünnschichtsolarzelle sind viele, oft thermodynamisch komplexe Prozessschritte nötig. Klassische statistische Verfahren sind für die Arbeit mit einem solchen hochdimensionalen Parameterraum weniger erfolgversprechend. Maschinelles Lernen kommt hingegen mit diesen hochdimensionalen Daten sehr gut zurecht, insbesondere mit den komplexen Zusammenhängen, die innerhalb der Datensätze verborgen liegen. Durch deren Modellierung ist es möglich, optimierte Prozessparametersätze vorherzusagen und nach wissenschaftlicher Evaluation weiter in die Anwendung zu überführen. Entwicklungszeiten werden sich dadurch in Zukunft signifikant verkürzen lassen.

// A digital twin for CIGS thin-film PV

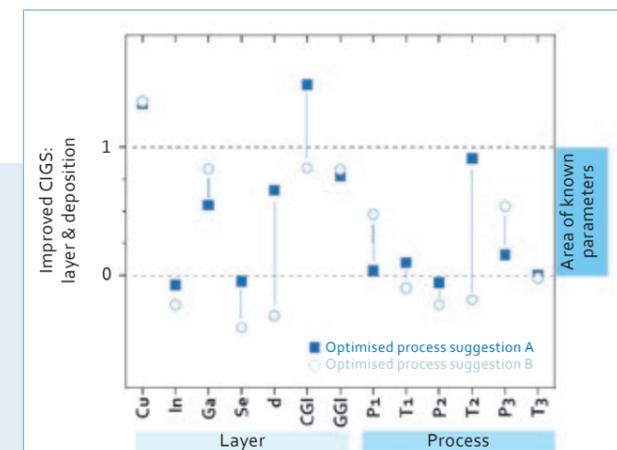
As part of its digitalisation strategy, the Federal State of Baden-Württemberg has been promoting research on the “self-learning solar factory” since 2019. Key aspects of digitalisation include the asset administration shells, or the “digital twin”, of facilities as well as the prediction and ongoing development of product properties such as the efficiency of solar cells using machine learning.

// Self-learning systems

CIGS coating is carried out in a thermodynamically complex system which, however, can already be well modelled right from the start using machine learning, mainly with neural networks. With such models, it should be possible to bring about and stabilise the two essential operating states of a CIGS coating system – start-up and coating – more quickly.

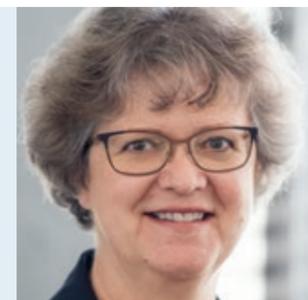
// Smart process development tools

Many and often thermodynamically complex process steps are needed to produce a CIGS thin-film solar cell. Conventional statistical methods are less successful when working with such a high-dimensional parameter space. Machine learning, on the other hand, handles this high-dimensional data very well, in particular the complex relationships that are hidden within the data sets. By modelling these data, it becomes possible to predict optimised process parameter sets (see fig. below) and, after a scientific evaluation, to transfer them to application. This will accelerate development times significantly in the future.



// Optimierung der Leerlaufspannung von CIGS-Solarzellen. Vorhersage zweier optimierter Prozessparametersätze und CIGS-Schichteigenschaften zur Maximierung der Leerlaufspannung mit maschinellem Lernen.
 // Optimisation of the open-circuit voltage of CIGS solar cells. Prediction of two optimised process parameter sets and CIGS layer properties to maximise open-circuit voltage with machine learning.

// Dr. Andreas Bauer
 E-mail: andreas.bauer@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-231



„Die Photovoltaik als ein Grundpfeiler einer klimafreundlichen Energieversorgung benötigt effiziente, umweltfreundliche und kostengünstige Materialien und Produktionstechnologien, die wir für unsere Industriepartner entwickeln.“

// Dr. Wiltraud Wischmann, Head of Department
 E-mail: wiltraud.wischmann@zsw-bw.de, phone: +49 711 7870-256

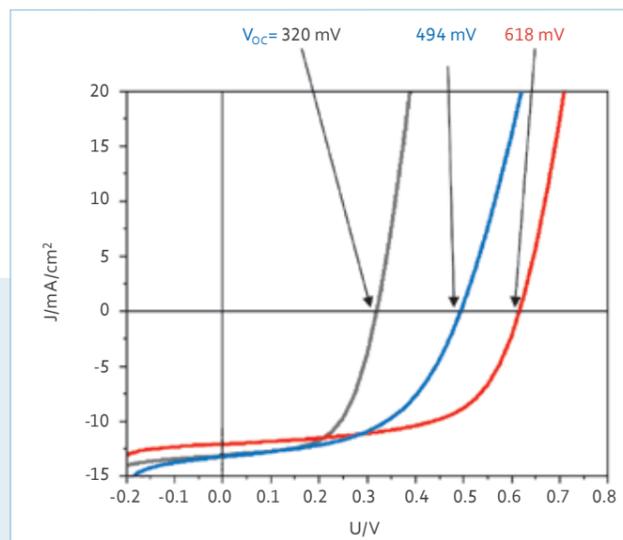
“Photovoltaics as a cornerstone of climate-friendly energy supply requires efficient, environmentally friendly and inexpensive materials and production technologies, which we develop for our industrial partners.”



// Bleifreie Perowskit-Solarzellen

Die Perowskit-Technologie bietet die Möglichkeit, sehr kostengünstige und hocheffiziente Solarzellen und -module herzustellen. Auf dem Weg zu einer erfolgreichen Kommerzialisierung sind vor allem zwei Aspekte noch zu verbessern: Neben der Langzeitstabilität und der Skalierung auf große Flächen ist die Umweltverträglichkeit bei der Herstellung und späteren Anwendung entscheidend. Die aktuell verwendeten Forschungszellen benötigen bislang schwere Bleiatome im Perowskit-Kristallverbund, um höchste Effizienz zu erreichen. Das ZSW forscht daher im vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt CAPITANO und im von der EU geförderten Projekt PERCISTAND auch an Möglichkeiten, alternative, nicht bleibasierte Perowskite mit hohen Wirkungsgraden zu entwickeln. Ein Fokus liegt dabei auf der Substitution des Bleis durch das chemisch verwandte Zinn zum Perowskit FASnI_3 (FA = Formamidinium).

Der Zellaufbau umfasst neben einem transparenten lichtzugewandten Kontakt, dem Rückkontakt und der eigentlichen Perowskit-Absorberschicht auch elektrisch leitende Zwischenschichten. Es konnte erfolgreich gezeigt werden, dass die Zellspannung durch eine Anpassung der sogenannten Elektronenleiterschicht massiv gesteigert werden kann (s. Abb. unten). Dies ist ein wichtiger Schritt zur Realisierung von Alternativen, die den Effizienzen von bleihaltigen Perowskiten näherkommen könnten.



// Lead-free perovskite solar cells

Perovskite technology offers the opportunity to produce very low-cost, high-efficiency solar cells and modules. However, two aspects in particular still need to be improved on the way to successful commercialisation: in addition to long-term stability and scalability to large surface areas, environmental sustainability during production and subsequent application is crucial. The currently used research cells still require heavy lead atoms within the perovskite crystal composite to achieve the highest efficiency. ZSW is therefore also researching ways to develop alternative, non-lead-based perovskites with high efficiencies as part of the CAPITANO project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and the PERCISTAND project funded by the EU. One focus is on substituting lead with the chemically related tin to form perovskite FASnI_3 (FA = formamidinium).

The cell design incorporates a transparent light-facing contact, the rear contact and the actual perovskite absorber layer as well as electrically conductive intermediate layers. It has been demonstrated that the cell voltage can be greatly increased by adjusting the so-called electron-conductive layer (see fig. below). This is an important step towards creating alternatives closer in efficiency to lead-based perovskites.

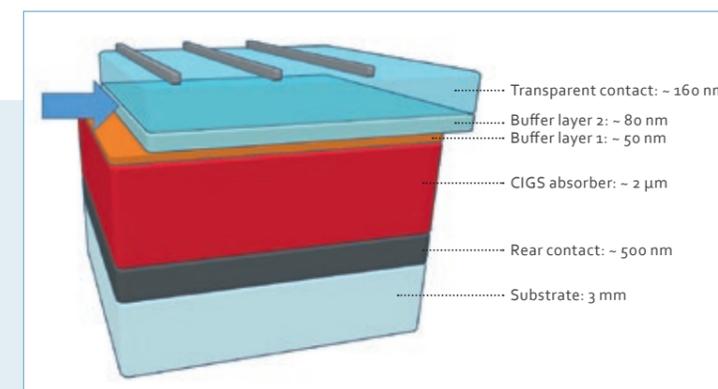
// Zinnbasierte Perowskite: Steigerung der Zellspannung durch Optimierung von drei verschiedenen Elektronenleiterschichten.
 // Tin-based perovskites: increasing cell voltage by optimising three different electron-conductive layers.

// Dr. Erik Ahlswede
 E-mail: erik.ahlswede@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-247

// Neues Fenster zur Sonne für Dünnschichtsolarzellen

In hocheffizienten Dünnschicht- und Siliziumsolarzellen werden transparente Kontaktschichten eingesetzt, um den generierten Strom auf der lichtzugewandten Seite zu den äußeren Kontakten zu transportieren (s. Abb. unten). Diese Schichten bestehen aus sogenannten transparenten, leitfähigen Oxiden („transparent conductive oxide“, TCO) und müssen gleichzeitig physikalisch eigentlich widersprüchliche Eigenschaften aufweisen: metallische Leitfähigkeit und sehr hohe optische Transparenz. Traditionell werden in CIGS-Solarzellen Schichten aus aluminiumdotiertem Zinkoxid (ZnO:Al) eingesetzt. Diese tragen jedoch nach wie vor signifikant zu optischen und elektrischen Verlusten durch Absorption und eine begrenzte Elektronenbeweglichkeit bei. Daher wurden am ZSW im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) geförderten Projekts CISHiTec Herstellungsprozesse für wasserstoffdotierte Indiumoxidschichten ($\text{In}_2\text{O}_3\text{:H}$) entwickelt, die gleichzeitig transparenter und leitfähiger sind als herkömmliche Schichten. Sie kamen bereits in CIGS- und Perowskit-Solarzellen zum Einsatz und tragen zu einer deutlichen Steigerung des Wirkungsgrades bei.

Eine weitere Reduktion optischer Verluste in Dünnschichtsolarzellen kann durch Anpassung der Pufferschichten erreicht werden. In dem vom BMWi geförderten Projekt ALDELA wurde am ZSW eine Anlage zur Atomlagenabscheidung (ALD, siehe Foto oben) in Betrieb genommen, die eine sanfte und schädigungsarme Beschichtung mit extrem dünnen und gut bedeckenden Schichten ermöglicht, deren optische und elektrische Eigenschaften sich fein abstimmen lassen. Das ist insbesondere für sensible Substrate wie CIGS-Absorberschichten ein großer Vorteil. Erste Pufferschichten aus Zink-Magnesium-Oxid liefern bereits wenige Monate nach Start der Entwicklungsarbeiten vergleichbare Wirkungsgrade wie herkömmliche Schichten, die mittels Kathodenstrahlzerstäuben hergestellt wurden.



// Schematischer Aufbau einer CIGS-Solarzelle.
 // CIGS solar cell schematics.

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

// Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)



// Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung von Qualität und Zuverlässigkeit von Photovoltaik (PV)-Modulen sowie der effiziente Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder des Fachgebiets und seiner Kunden. Mit jahrzehntelanger Erfahrung werden im Testlabor Solab und auf dem Freiland-Testfeld Widderstall PV-Module und -Systeme hinsichtlich Energieertrag und Langzeitstabilität vermessen und Charakteristiken abgeleitet. Die entwickelten Methoden fließen bei der Mitarbeit in Normungsgremien ein und kommen unseren Kunden zugute.

Der Bedarf an schadensanalytischen Untersuchungen von PV-Modulen aus Solarparks nimmt deutlich zu. Qualitätsprobleme mit polymerbasierten Modulrückseiten bilden dabei einen Schwerpunkt und werden sowohl im Testlabor als auch vor Ort im Solarpark untersucht. Weiterhin besteht ein deutlicher Bedarf an Beratungsdienstleistungen zur Qualitätssicherung von PV-Modulen für geplante PV-Projekte. Erstmals wurde im Rahmen einer technischen Due Diligence die Inspektion einer PV-Produktionsstätte in einem EU-Land nicht durch das ZSW vor Ort durchgeführt, sondern virtuell in Kooperation mit einem lokalen Partner.

Photovoltaiksysteme tragen wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung bei. Die geeignete Verknüpfung mit elektrischen Speichern, die Kopplung der Nachfragesektoren und Lastverschiebung erhöhen die lokale Nutzung von Solarstrom, entlasten die Verteilnetze und tragen dezentral zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch bei. Die Analyse entsprechender Potenziale sowie die Entwicklung von Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten einschließlich geeignetem Lademanagement für die Elektromobilität sind daher weiterführende Themen im Fachgebiet. Seine Expertinnen und Experten beraten bei der Entwicklung und Anwendung entsprechender Algorithmen für den Netzbetrieb und den Energiemarkt. In Zusammenarbeit mit dem ZSW-Fachgebiet Systemanalyse werden Prognosen von Erzeugung und Last für den Datenaustausch zwischen den Netzbetreibern im Rahmen von Redispatch 2.0 geliefert.

// Our main focus

The two major focus areas of the department and its customers are ensuring the quality and reliability of photovoltaic modules and the efficient use of solar power within the energy supply system. With decades of experience, PV modules and systems are measured in the Solab test laboratory and on the Widderstall outdoor testing facility with regard to energy yield and long-term stability, and characteristics are then derived. The methods developed are put to use in standardisation committees and benefit our customers.

The demand for damage analyses of PV modules from solar parks is growing significantly. Quality issues with the polymer-based rear sides of modules are a focal point and are investigated both in the test laboratory and on-site in the solar park. There is still a definite demand for consulting services on the quality assurance of PV modules for planned PV projects. For the first time ever, the technical due diligence inspection of a PV production facility by ZSW in an EU country was not carried out on-site, but instead virtually in cooperation with a local partner.

Photovoltaic systems make a significant contribution to ensuring a sustainable electricity supply. Appropriate linking with electrical storage systems, coupling demand sectors and load shifting increase the local use of solar power, relieve the distribution networks and contribute to a decentralised balance of power generation and consumption. Analyses of corresponding potentials as well as the development of algorithms for the optimised operation of generators, storage systems and loads, including suitable charging management for e-mobility are therefore further topics addressed by the research department. Our experts advise on the development and application of appropriate algorithms for grid operation and the energy market. In cooperation with ZSW's Systems Analysis department, generation and load forecasts are provided for data exchange between grid operators as part of Redispatch 2.0.

// Maschinelles Lernen unterstützt die Gebrauchsdauerabschätzung von PV-Modulen

Die Leistungsfähigkeit von PV-Modulen kann je nach Typ durch den PID-Effekt (Potenzial-Induzierte Degradation) beeinträchtigt werden, der durch Leckströme hervorgerufen wird. Die in der Betriebszeit am jeweiligen Standort transportierte Ladungsmenge ist dabei der entscheidende Vorhersageparameter.

Die Leckströme, die von den elektrisch aktiven Zellen über die Isolationsstrecken zur Erde abfließen, hängen in komplexer Weise von den Umgebungsbedingungen des PV-Moduls ab und können im Tagesverlauf stark variieren (s. Abb. unten links). Deshalb ist es eine anspruchsvolle Modellierungsaufgabe, die wirksame Ladungsmenge aus den Daten einer begrenzten Testperiode abzuschätzen und sie auf einen anderen Standort zu übertragen.

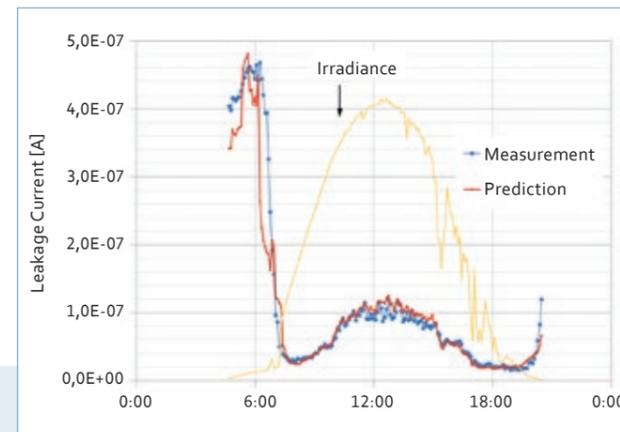
Für diese Modellierungen wurden am ZSW entwickelte Verfahren des maschinellen Lernens eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass die gemessenen Daten mit künstlichen neuronalen Netzen sehr gut wiedergegeben werden können (s. Abb. unten rechts). Dies eröffnet die Möglichkeit, den Aufwand für Freifeldmessungen von Leckströmen zur Abschätzung der Gebrauchsdauer von PV-Modulen unter PID-Belastung auf wenige Testmonate an spezifischen Standorten zu reduzieren.

// Machine learning assists in the service life estimation of PV modules

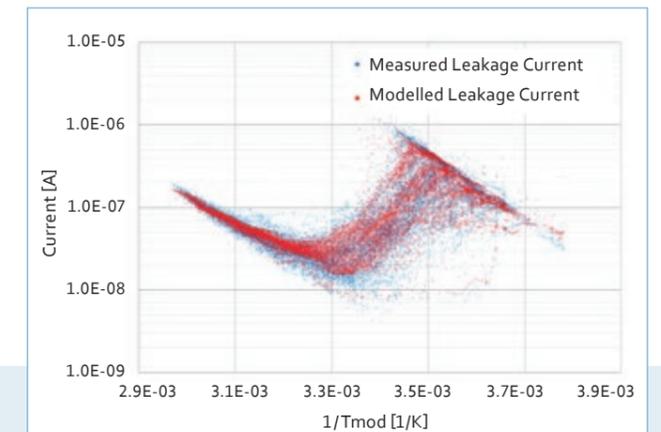
Depending on the type of PV module, performance can be affected by the PID (Potential Induced Degradation) effect, which is caused by leakage currents. The amount of charge transported during the operating period at the respective location is the decisive predictive parameter in this regard.

The leakage currents that flow from the electrically active cells to earth via the insulation pathways depend in a complex fashion on the ambient conditions of the PV module and can vary greatly over the course of the day (see fig. below left). It is thus a challenging modelling problem to estimate the effective amount of charge based on the data collected during a limited test period and transfer this to another location.

Machine learning methods developed at ZSW were used for these modelling tasks. It was shown that the measured data can be reproduced very well with artificial neural networks (see fig. below right). This opens up the opportunity to limit the effort for open-field measurements of leakage currents used to estimate the service life of PV modules under PID load to a few test months at selected locations.



// Gemessene und modellierte Leckstromwerte eines PV-Moduls im Laufe eines Tages.
// Measured and modelled leakage current values of a PV module over the course of a day.



// Arrhenius-Diagramm von gemessenen (blau) und modellierten (rot) Leckströmen.
// Arrhenius plot of measured (blue) and modelled (red) leakage currents.



„Die hohe Qualität von Photovoltaikmodulen und effiziente Nutzung des Solarstroms unterstützen eine sichere Versorgung mit erneuerbaren Energien.“

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

„The high quality of photovoltaic modules and an efficient use of solar power contribute to a secure supply with renewable energy.“

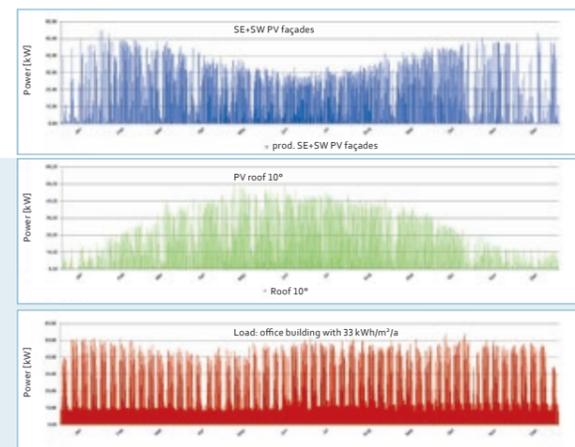
// Dirk Stellbogen
E-mail: dirk.stellbogen@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-221



// Bauwerksintegrierte Photovoltaik

Im Rahmen des BMWi-Verbundvorhabens CIGS-Fassade – Fassadenintegrierte Photovoltaik-Systeme in CIGS-Technologie – simulierte das ZSW den erzielbaren Eigenversorgungsanteil und Eigenverbrauchsanteil von PV-Anlagen an Gebäuden für ein Modellgebäude. Dabei wurden als gemessene Eingangsdaten die jährlichen Erzeugungsprofile der südost- und südwestorientierten PV-Fassaden des ZSW-Bürogebäudes in Stuttgart und das Lastprofil eines typischen Verwaltungsgebäudes verwendet.

Als Modell diente ein fünfstöckiges Bürogebäude mit einer Gesamtfläche von 5.200 m² und einem elektrischen Energieverbrauch (ohne Heizung) von 33 kWh/m²/a, welcher relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt ist. Dabei wurden die Südost- und die Südwestfassade von Geschoss 2 bis 5 mit 78 kWp PV-Leistung ausgestattet, was einem Flächenbelegungsgrad von 23% entspricht. Auf dem Flachdach wurde ein PV-Generator mit 10° Neigung in SO/NW und SW/NO-Richtung mit insgesamt 53 kWp Leistung bei einer Flächenbelegung von 30% platziert (s. Abb. unten rechts). Betrachtet man ausschließlich die Stromerzeugung der PV-Fassaden, so ergibt sich ein Eigenversorgungsanteil von 29% und ein Eigenverbrauchsanteil von 82% im Zeitraum von einem Jahr. Die Kombination von PV-Fassaden und -Dach steigert den Eigenversorgungsanteil auf 39% und ergibt einen Eigenverbrauchsanteil von 58%. Dieser hohe Anteil des im Gebäude selbst verbrauchten Stroms an der eigenen Stromerzeugung ist – aufgrund der hohen Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch – auch ohne Batteriespeicher möglich. Während für die Dachanlage erwartungsgemäß die größten Leistungswerte in den Sommermonaten auftreten, ergänzt die PV-Fassade durch ihre höchste Leistungsabgabe während der Wintermonate das jährliche Erzeugungsprofil auf ideale Weise (s. Abb. unten links).

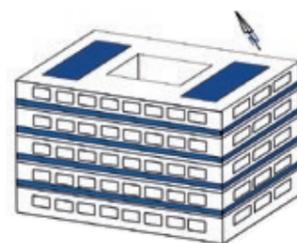


// Stromlieferung durch PV-Anlagen und Verbrauch auf Gebäudeebene:
Hochrechnung auf Basis der Anlagendaten am ZSW-Gebäude in Stuttgart.
// Electricity supply by PV systems and consumption on the building level:
extrapolation based on system data obtained from the ZSW building in Stuttgart.

// Building-integrated photovoltaics

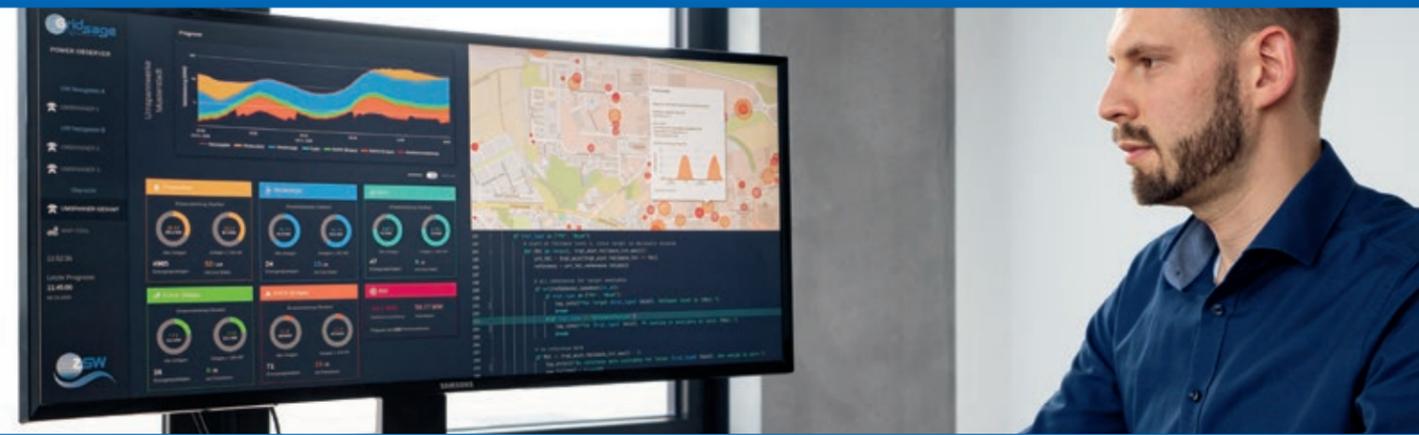
ZSW simulated the achievable self-supply share and self-consumption share of PV systems on buildings for a model building as part of the BMWi joint project "CIGS Façade – Façade-integrated Photovoltaic Systems with CIGS Technology". The annual generation profiles of the south-east- and south-west-facing PV façades of the ZSW office building in Stuttgart and the load profile of a typical administrative building were used as measured input data.

A five-storey office building with a total space of 5,200 m² and an electrical energy consumption (without heating) of 33 kWh/m²/a, distributed relatively evenly over the year served as a model. The south-east and south-west façades of floors 2 to 5 were fitted with 78 kWp of PV capacity, which corresponds to a 23% surface coverage. A PV generator with a 10° SE/NW and SW/NE inclination, a total capacity of 53 kWp and a 30% surface coverage (see fig. below right) was placed on the flat roof. If one considers only the electricity generated by the PV façades, the result is a self-supply share of 29% and a self-consumption share of 82% over a period of one year. Combining PV façades and a PV rooftop increases the share of self-supply to 39% and results in a 58% share of self-consumption. This high ratio of self-consumed electricity generated in the building is also possible without battery storage due to the high simultaneity of generation and consumption. While, as expected, the highest output values of the rooftop system occur during the summer months, the PV façade complements the annual generation profile in an ideal way with its maximum power output during the winter months (see fig. below left).



// Simuliertes Bürogebäude mit PV-Fassaden auf der SO- und SW-Seite und einem PV-Dach.
// Simulated office building with PV façades on the SE and SW of the building and a PV roof.

// Dieter Geyer
E-mail: dieter.geyer@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-271

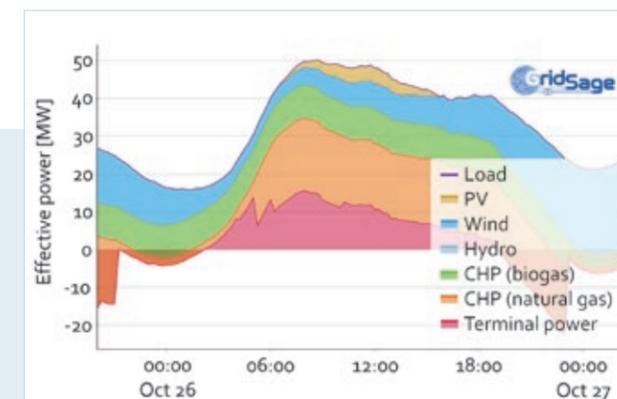


// Prognose-Tool GridSage

Im Rahmen des gesetzlich vorgeschriebenen Redispatch 2.0 ergeben sich neue Anforderungen an Verteilnetzbetreiber. So müssen diese ab 1. Oktober 2021 Prognosen für alle Erneuerbare-Energien- und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen mit einer installierten Leistung ≥ 100 kW liefern, um einen kosteneffizienten Redispatch zu ermöglichen.

Das ZSW hat mit dem Prognose-Tool GridSage hierfür eine innovative Lösung entwickelt. GridSage liefert nicht nur Prognosen für alle Energieerzeugungsanlagen eines Verteilnetzbetreibers, es prognostiziert darüber hinaus auch Netzabgaben und Klemmenleistungen an allen Netzverknüpfungspunkten (s. Abb. unten). Auch lassen sich Fahrpläne aus Marktplatzplattformen oder aktuelle Messwerte der Erzeugungsanlagen integrieren. Die Nutzung des Prognose-Tools verhindert Netzengpässe und macht Verteilnetze transparent und zukunftssicher. Die Prognosen mit einem Horizont von 36 Stunden und einer Auflösung von 15 Minuten werden mithilfe von maschinellem Lernen erstellt: Neuronale Netze lernen aus Daten aus der Vergangenheit, welche Erzeugungsanlage bei welchen Wetterbedingungen wie viel Leistung erzeugt hat. Diese Information nutzt GridSage, um automatisiert hochauflösende Prognosen für die nächsten Stunden und den nächsten Tag zu erzeugen und diese an den Verteilnetzbetreiber zu senden.

Das Tool wurde im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten SINTEG-Projekts C/sells entwickelt. Die erfolgreiche Anwendung wurde im Verteilnetz der Stadtwerke Schwäbisch Hall prototypisch umgesetzt. Deren Verbundleitwarte erhält seither rund um die Uhr belastbare Prognosen und Informationen zur aktuellen Einspeisung und Last.



// GridSage forecasting tool

New requirements for distribution grid operators arise within the framework of the legally prescribed Redispatch 2.0. Starting 1 October 2021, grid operators will have to provide forecasts for all renewable energy and combined heat and power plants with an installed capacity of ≥ 100 kW in order to achieve a cost-effective redispatch.

With its forecasting tool GridSage, ZSW has developed an innovative solution for this very purpose. GridSage not only provides forecasts for all power generation plants of distribution grid operators but it also forecasts grid delivery and connected gross power at all grid connection points (see fig. below). Schedules from marketplace platforms or up-to-date readings from power generation plants can also be integrated. The forecasting tool prevents grid bottlenecks and renders distribution grids transparent and future-proof. The forecasts with a horizon of 36 hours and a resolution of 15 minutes are created with the aid of machine learning: neural networks learn from past data which power generation plant generated how much power and under which weather conditions. GridSage uses this information to automatically generate high-resolution forecasts for the next few hours as well as the next day and sends them to distribution grid operators.

The tool was developed as part of the SINTEG project C/sells funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. A successful prototype application was implemented in the distribution network of the Schwäbisch Hall municipal utility. Ever since, their control centre has been receiving reliable forecasts and information on the current feed-in and load conditions around the clock.

// Prognose der Summe von Einspeisung, Last und Netzklemmenleistung durch das Prognose-Tool GridSage.
// Forecast of the sum of feed-in, load and grid-connected terminal power using the GridSage forecasting tool.

// Christian Tomschitz
E-mail: christian.tomschitz@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-321

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

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet Regenerative Energieträger und Verfahren befasst sich mit der Erzeugung regenerativer Kraftstoffe im Kontext Power-to-X (P2X) sowie mit der Realisierung geschlossener Stoffkreisläufe, z. B. mit Verfahren zum Phosphor-Recycling oder rohstofflichen Kunststoff-Recycling.

Mit unserem verfahrenstechnischen Know-how werden anwendungsnahe Technologiebausteine zur strombasierten Herstellung von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen entwickelt und im technischen Maßstab umgesetzt und erprobt.

Wir entwickeln serientaugliche und skalierbare Materialien und Fertigungsmethoden für Elektrolyseure und verfügen über eigene Elektrolyseblock- und Systemtechnologien bis in den MW-Maßstab. Wir bieten unseren Kunden aber auch vielfältige Testmöglichkeiten sowohl in den ZSW-eigenen Laboren als auch in Realumgebung an, z. B. in unserer Forschungsplattform am Power-to-Hydrogen-Standort in Grenzach-Wyhlen. Als weiteres Kernelement für P2X-Prozesse entwickeln wir Verfahren zur effizienten regenerativen CO₂-Bereitstellung, z. B. aus Luft oder biogenen Reststoffen, und verfügen über langjährige Erfahrungen im Bereich von P2X-Syntheseprozessen, z. B. zu Methan oder Methanol.

Mit unserem Engineering- und System-Know-how haben wir bereits mehrere eigene Power-to-Gas- bzw. Elektrolyse-Anlagen im Leistungsbereich zwischen 25 kW_{el} und 1 MW_{el} am ZSW errichtet und beraten Industriekunden vom Basic-Engineering bis zur Inbetriebsetzung kommerzieller Anlagen wie auch beim anschließendem Technologie-Monitoring.

Neben unseren P2X-Aktivitäten entwickeln wir innovative Verfahren zum Thema Reststoff-Verwertung und Rohstoff-Recycling. So erforschen wir Konzepte zum Recycling von Phosphor bzw. zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoff-Abfällen.

// Our main focus

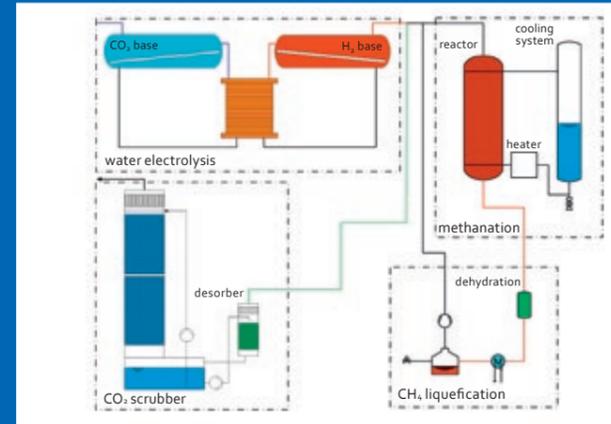
The Renewable Fuels and Processes department works on the production of renewable fuels in the context of Power-to-X (P2X) as well as the realisation of closed material cycles, for example recycling processes for phosphorus and plastic feedstock.

Our process engineering expertise is applied to the development of application-oriented technology modules for electricity-based production of hydrogen and synthetic fuels which are then implemented and tested on a technical scale.

We develop scalable materials and production methods for electrolyzers suitable for series production and have developed our own electrolysis block and system technologies up to the MW range. We offer our customers a wide range of testing opportunities both in ZSW's own laboratories and in real environments, such as our research platform at the Grenzach-Wyhlen Power-to-Hydrogen site. We also develop processes for an efficient, renewable provision of CO₂, for example from air or biogenic residues, as a further core element of P2X processes and have many years of experience in the field of P2X synthesis, including methane and methanol.

Thanks to our engineering and systems expertise, we have already built several of our own Power-to-Gas and electrolysis plants in the range of 25 kW_{el} to 1 MW_{el} at ZSW and provide consulting services to industry customers on everything from basic engineering and commissioning of commercial plants to subsequent technology monitoring.

Besides our P2X activities, we develop innovative processes related to residual materials utilisation and raw materials recycling. For example, we are researching concepts for phosphorus and plastic feedstock recycling.



// eLNG aus Luft – Erzeugung CO₂-neutraler Importgase

Deutschland wird auch künftig ein Energie-Importland bleiben: gasförmige oder flüssige aus erneuerbarem Strom hergestellte Energieträger, sogenannte eFuels, werden an Standorten mit günstigen Stromerzeugungspotenzialen (z. B. Nordafrika, Südamerika oder Australien) erzeugt und nach Europa transportiert. Als Energietransportvektoren kommen Energieträger wie Methanol oder flüssige Kohlenwasserstoffe in Frage. An entlegenen Standorten ist dabei das für Syntheseprozesse erforderliche CO₂ aus der Luft zu gewinnen, falls keine konzentrierten CO₂-Quellen vor Ort verfügbar sind.

Im Forschungsprojekt „eLNG aus Luft“, gefördert durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, soll der Machbarkeitsnachweis eines solchen Gesamtprozesses ausgehend von Luft-CO₂ und Elektrolyse-H₂ zur Herstellung eines CO₂-neutralen Energieträgers am Beispiel von verflüssigtem Methan erbracht werden. Das ZSW kann dabei auf bereits vorhandene, eigenentwickelte Technologiebausteine wie die Elektrolyse, CO₂-Abscheidung aus Luft und Methansynthese aufbauen (s. Abb. unten) und diese mit Bezug auf eine effiziente Gesamtprozesskette adaptieren sowie verschalten. Des Weiteren wird in dem Projekt ein konzeptioneller Scale-up der Technologie in den industriellen MW-Maßstab unter Angabe von Massen- und Energiebilanzen ausgearbeitet. Hierauf aufbauend werden realisierbare Wertschöpfungspotenziale insbesondere für Baden-Württemberg analysiert und potenzielle Exportmärkte für die entwickelten Technologien identifiziert. Die begleitenden Arbeiten dienen im Wesentlichen der Vorbereitung einer Technologievermarktung in Regionen, die als Lieferländer für synthetische Kohlenwasserstoffe fungieren können.



// Container-integrierte Anlage zur CO₂-Gewinnung aus Luft.
// Container-integrated plant for CO₂ extraction from the ambient air.

// eLNG from the air – production of CO₂-neutral imported fuels

Looking forward, Germany will remain an energy importing country: gaseous or liquid energy carriers produced using renewable electricity, so-called eFuels, will be produced at locations with favourable renewable electricity generation potential (e.g. North Africa, South America or Australia) and then transported to Europe. Energy carriers such as methanol or liquid hydrocarbons can be used as energy transport vectors. At remote locations, the CO₂ required for synthesis processes must be extracted from the air if there are no concentrated CO₂ sources available locally.

In the „eLNG from the air“ research project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs, the aim is to demonstrate the feasibility of such an overarching process for the production of a CO₂-neutral energy carrier, based on ambient CO₂ and electrolytic H₂ using the example of liquefied natural gas (LNG). ZSW will be able to build on existing, self-developed technology modules such as electrolysis, CO₂ extraction from the air and methane synthesis (see fig. below) and adapt and combine them with special attention to an efficient overall process chain. Moreover, the project will draw up a conceptual scale-up of the technology to the industrial MW-scale, specifying mass and energy balances. Based on that, realisable value creation potentials will be analysed, especially for Baden-Württemberg, and potential export markets for the developed technologies will be identified. The accompanying work essentially serves to prepare technology marketing in regions that could function as supplier countries for synthetic hydrocarbons.



// Testplattform Methansynthese (links).
// Experimental setup of a methane synthesis reactor (left).

// Methanverflüssigungsanlage im Technikumsmaßstab (rechts).
// Methane liquefaction plant on a pilot scale (right).

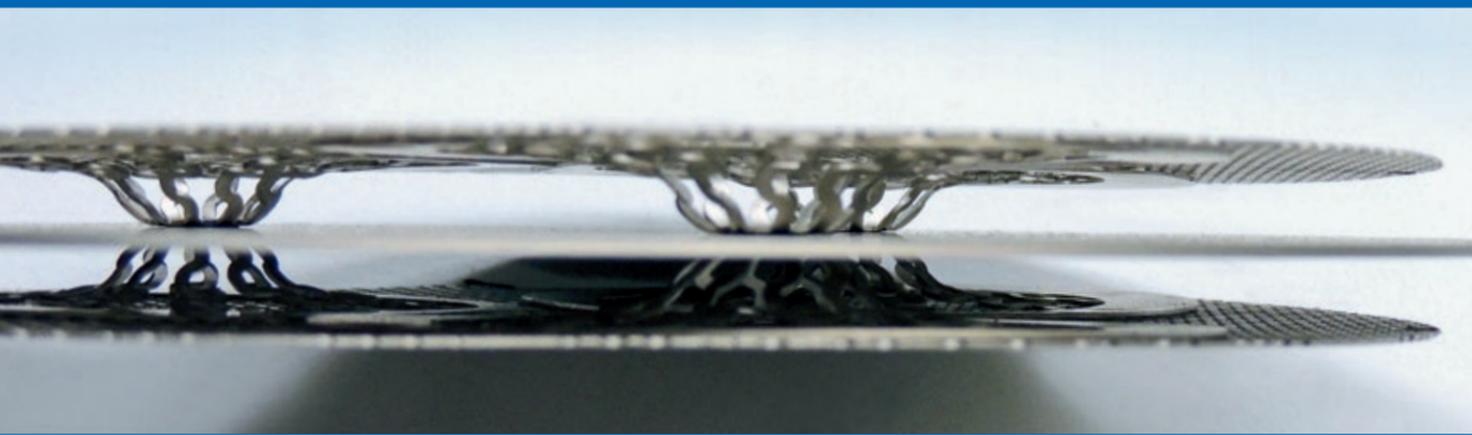


„Wir entwickeln anwendungsnahe Technologiebausteine im Kontext von P-to-X und unterstützen unsere Industriekunden bei der Umsetzung.“

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

„We develop application-oriented technology modules related to P-to-X and support our industrial clients in their implementation.“

// Dipl.-Ing. (FH) Bernd Stürmer
E-mail: bernd.stuermer@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-249



// Elektrolyse made in Baden-Württemberg

Grüner Wasserstoff ist ein Schlüsselement der globalen Energiewende und gewinnt nicht zuletzt durch die nationale und europäische Wasserstoffstrategie immer mehr an Bedeutung. So wächst auch die Nachfrage nach den Wasserstoff-erzeugenden Elektrolyseanlagen stark. Für Unternehmen in Baden-Württemberg, wie den exportorientierten Maschinen- und Anlagenbau, aber auch die Zulieferindustrie, eröffnen sich damit große wirtschaftliche Chancen. Das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderte und vom ZSW koordinierte Projekt „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“ will insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen dabei unterstützen, ihre Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit zu stärken.

Eine wichtige Säule des Projektes ist der breite Industriedialog, um Unternehmen zu informieren, für die neue Technologie zu qualifizieren und zu vernetzen. Dieser startete im Juli 2020 mit einer Online-Auftaktveranstaltung mit insgesamt 130 Teilnehmern, bei der ein Überblick über die wirtschaftlichen und politischen Randbedingungen sowie eine Einführung in die Elektrolysetechnologie gegeben wurde. Im Herbst 2020 konnten sich interessierte Unternehmen in Themen-Workshops tiefergehend über die Elektrolysetechnologie und die jeweiligen Anforderungen an die Einzelkomponenten und Baugruppen informieren. Das Informationsmaterial ist auf der Projekthomepage www.bw-elektrolyse.de öffentlich zugänglich.

Als Aushängeschild für die Wertschöpfungspotenziale im Land entsteht im Projektrahmen ein produktnaher Systemdemonstrator „made in Baden-Württemberg“ in der 1-Megawatt-Klasse.

// Electrolysis made in Baden-Württemberg

Green hydrogen is a key element of the global energy transition and is becoming increasingly important, not least due to the national and European hydrogen strategy. Consequently, the demand for hydrogen-generating electrolysis plants is also rising sharply. This creates great economic opportunities for companies in Baden-Württemberg, such as the export-oriented mechanical and plant engineering industry, but also the supplier industry. The “Electrolysis made in Baden-Württemberg” project, funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs and coordinated by ZSW, aims to support small and medium-sized enterprises in particular in strengthening their future viability and competitiveness.

One important pillar of the project is the extensive industrial dialogue aiming to inform companies and qualify them for the new technology as well as offer networking opportunities. This began in July 2020 with an online kick-off event with a total of 130 participants. It provided an overview of the economic and political framework conditions as well as an introduction to electrolysis technology. In autumn 2020, interested companies had the chance to learn more about electrolysis technology and the respective requirements placed on the individual components and modules in themed workshops. The information material is publicly available on the project homepage www.bw-elektrolyse.de.

As a showcase for the value creation potential in Baden-Württemberg, a product-related system demonstrator “made in Baden-Württemberg” in the 1-megawatt class is being built as part of the project.

Der alkalische Druck-Elektrolyseur wird am ZSW aufgebaut und soll möglichst viele verfahrens- und elektrotechnische Komponenten (z. B. Pumpen, Ventiltechnik, Leistungselektronik, Steuerungstechnik) und Fertigungstechnologien aus Baden-Württemberg beinhalten. Das bietet den beteiligten Unternehmen die Möglichkeit, eigene Produkte in einer Systemumgebung zu testen und öffentlichkeitswirksam zu präsentieren. Mit Blick auf eine erfolgreiche Industrialisierung erfolgt die Planung des Systemdemonstrators modular nach einem Baukastensystem, wobei durch Standardisierung, gute Skalierbarkeit und zukünftig auch durch automatisierte Serienfertigung der Markteintritt erleichtert werden soll. Der Systemdemonstrator soll Anfang 2022 in Betrieb gehen.

Mit Blick auf die Industrialisierung der Elektrolysetechnologie ermittelt das ZSW die Umsatz-, Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale für das Land und leitet daraus Handlungsempfehlungen für die Politik und Industrie ab, wie sie zeitnah erschlossen werden können.

Das Herzstück eines Elektrolyseurs ist der Elektrolyseblock, der maßgeblich die Effizienz und Kosten der Wasserstofferzeugung beeinflusst. Daher liegt der Fokus der begleitenden Forschungsaktivitäten auf den Schlüsselkomponenten des Elektrolyseblocks. Das ZSW ist federführend für das Elektrolyseblockkonzept und die Vorbereitung der Industrialisierung verantwortlich. An den Arbeiten sind auch verschiedene Partner aus der Innovationsallianz Baden-Württemberg beteiligt: An den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung (Denkendorf) wird an innovativen, effizienten und robusten Membranmaterialien geforscht und die Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung (Stuttgart) entwickelt blockintegrierte Mikrosensorik, um wichtige Betriebsgrößen am Ort der Gasentstehung erfassen zu können. Darüber hinaus arbeitet das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Stuttgart) an Verfahren zur katalytischen Beschichtung der Elektroden im Plasma-Spray-Verfahren.

The alkaline pressure electrolyser is being built at ZSW and is intended to include as many process and electrotechnical components (such as pumps, valve technology, power electronics and control technology) and production technologies from Baden-Württemberg as possible. This will give participating companies the opportunity to test their own products in a system environment and present them to the public. With a view to successful industrialisation, the system demonstrator is planned in a modular fashion following a construction kit system whereby standardisation, good scalability and, in the future, automated series production are intended to facilitate market entry. The system demonstrator is scheduled to go into operation at the beginning of 2022.

With a view to the industrialisation of electrolysis technology, ZSW is determining the turnover, value-added and employment potentials for the federal state and will derive recommendations for action for policymakers and the industry on how they might be tapped in a timely manner.

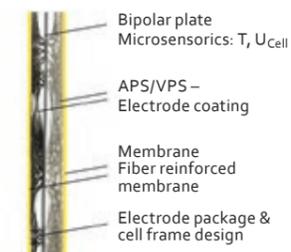
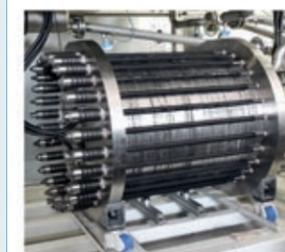
The heart of an electrolyser is the electrolysis block, which has a decisive impact on the efficiency and costs of hydrogen production. Therefore, the focus of the accompanying research activities is on key components of the electrolysis block. ZSW is in charge of the electrolysis block concept and the preparatory work for industrialisation. A number of partners from “Innovationsallianz Baden-Württemberg” are also involved in the ongoing work: innovative, efficient and robust membrane materials are being researched at the “German Institutes of Textile and Fiber Research Denkendorf”, and “Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung” (Stuttgart) is developing block-integrated microsensor technology to be able to record important operating variables at the point of gas generation. In addition, the German Aerospace Center in Stuttgart is working on processes for the catalytic coating of the electrodes using the plasma spray method.



Elektrolyse made in Baden-Württemberg
BW-Elektrolyse

// Unternehmen im Betätigungsfeld „Elektrolyse“ (Stand 7/2020).

// Companies involved in electrolysis (as per 7/2020).



Bipolar plate
Microsensors: T, U_{Cell}
APS/VPS –
Electrode coating
Membrane
Fiber reinforced
membrane
Electrode package &
cell frame design

// Prototyp ZSW-Elektrolyseblock (links) und Blick auf das Elektrodenpackage im Blockinneren (rechts).

// The prototype ZSW electrolysis block (left) and a view of the electrode package inside the block (right).

// **Tonja Marquard-Möllenstedt**

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

Phone: +49 711 7870-285

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



// Unsere Kernkompetenzen

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

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

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

// Our main focus

The ECM research department's work traditionally focusses on synthesising and characterising function materials for batteries and supercapacitors. The development of customised powders and pastes is a core competency. 30 years of materials research provides the basis for our comprehensive understanding of the interrelationship between structure and powder morphology on the one hand and the desired function and processing properties on the other. In addition to new cathode materials (such as high-voltage spinels, lithium transition metal phosphates and silicates) and anode materials (such as optimised carbon modifications, titanates and alloy anodes) for lithium-ion batteries, new electrolyte systems with special additives are being intensively researched. Our work also encompasses electrode materials for future systems such as lithium/sulphur and lithium/air.

Another focus is placed on the development of battery cells in the 18650 and 21700 formats and single-layer and stacked pouch cells. New manufacturing processes for more high-performance components for future lithium cell generations are a primary concern. For analysing damage and assessing new cells, the department specialises in post-mortem analyses. These are essential for understanding ageing processes and potential safety risks and for optimising cell design.

ECM is also researching post-lithium storage systems, including those based on sodium, magnesium and calcium. The work is carried out via the virtual centre for future energy storage systems CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe), which was founded jointly with KIT and the University of Ulm. CELEST is the largest German research and development platform for future energy storage systems and the origin of POLiS (Post Lithium Storage).

// Neue Methoden zur Charakterisierung von Batteriematerialien

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

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

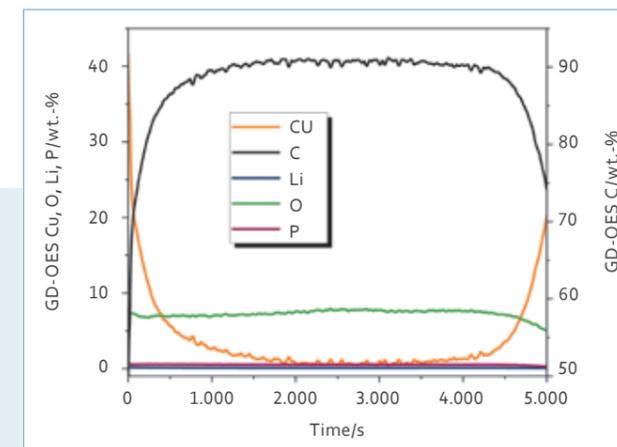
Mit dem Projekt TEESMAT soll die europäische Industrie bei der Batterieentwicklung durch innovative In-line-, Operando-, In-situ- und Ex-situ-Charakterisierungsmethoden unterstützt werden.

// New methods to characterise battery materials

Together with 19 partners from 10 countries, ZSW is researching new methods to characterise energy storage materials for lithium-ion batteries as part of the TEESMAT project which is funded by the European Union. The aim of the project is to demonstrate new or improved methods concerning ageing, safety, performance and production. These methods are demonstrated with reference to current issues faced by the participating industrial partners.

So far, six methods for the characterisation of battery materials have been developed at ZSW in TEESMAT. These include in operando methods for direct insight during the charging/discharging process and during thermal runaway in battery cells, as well as analysis methods for material characterisation from post-mortem analyses. One example is glow discharge optical emission spectroscopy (GD-OES), which makes it possible to determine depth profiles of the elemental distribution from the anode surface to the copper foil. ZSW developed a GD-OES analysis procedure which has shown that copper redeposits primarily on the anode surface during a deep discharge (see fig. below).

The TEESMAT project is intended to support the European industry in battery development through innovative in-line, operando, in-situ and ex-situ characterisation methods.



More information: www.teesmat.eu

// GD-OES-Tiefenprofil der Graphitanode mit Cu-Abscheidung aus einer kommerziellen 18650-Zelle nach Tiefentladung auf null Volt.
// GD-OES depth profile of the graphite anode with Cu deposition from a commercial 18650 cell after a deep discharge to zero volts.

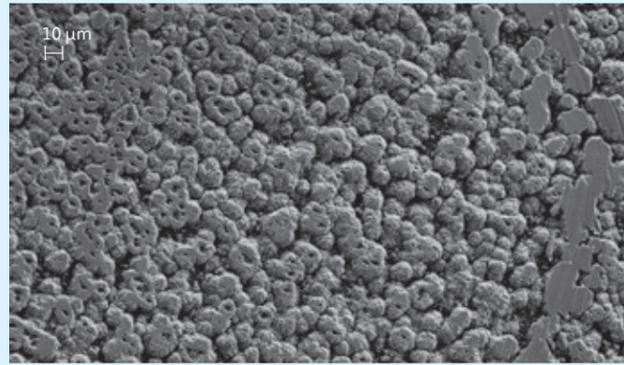
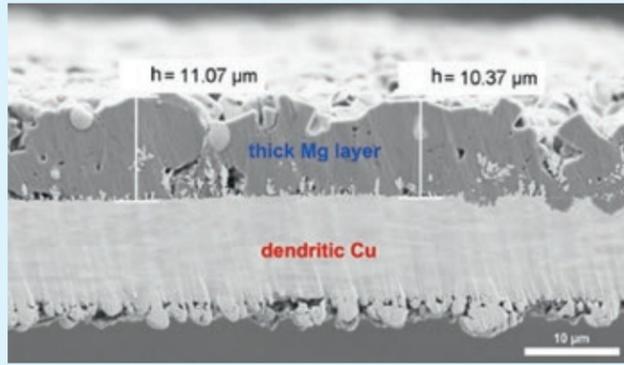


„Die E-Mobilität wird die Zulieferindustrie für die Automobilwirtschaft grundlegend verändern. Wir müssen alles daran setzen, um die Entwicklung und Produktion von Batteriesystemen zügig voranzutreiben – und damit die Zukunftsfähigkeit unserer Industrie in Deutschland zu sichern.“

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

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

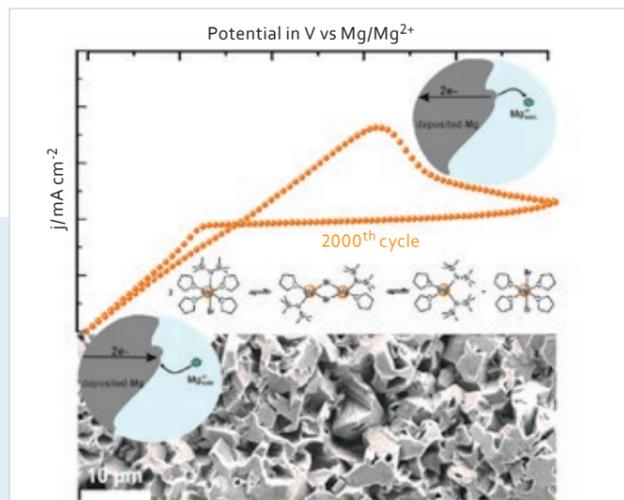
// Dr. Thomas Waldmann
E-mail: thomas.waldmann@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-212



// Post-Lithium-Ionen-Batterien

Zweifelsohne, weltweit führend ist die Lithium-Ionen-Batterietechnologie. Doch die wachsende Nachfrage nach Batterien mit noch höheren Wirkungsgraden hat eine Suche nach alternativen chemischen Zusammensetzungen ausgelöst. Das ZSW erforscht Post-Lithium-Batterien auf der Basis von monovalenten und divalenten Kationen wie Natrium (Na), Magnesium (Mg) und Calcium (Ca). Post-Lithium-Batterien stellen zugleich eine langfristige und risikoreiche Herausforderung und große Chance dar. Das Verständnis und die Lösung grundlegender Probleme zukünftiger Generationen von Batteriezellen könnte zu einer Erhöhung der Batterielebensdauer und -energie bei besserer Nutzung der materiellen Ressourcen führen. Dies wiederum könnte zur Kosteneinsparung und höheren Verbraucher- und Marktakzeptanz batteriebetriebener Produkte führen.

Das ZSW erforscht Post-Lithium-Batterien in mehreren nationalen Projekten des Bundesforschungsministeriums sowie als assoziierter Partner des Exzellenzclusters POLiS (DFG) zusammen mit dem Karlsruher Institut für Technologie, der Universität Ulm und der Universität Gießen. Innerhalb dieser Projekte erforscht das ZSW Anoden- und Kathodenmaterialien sowie Elektrolyte. Hierbei konnten zusammen mit der Friedrich-Schiller-Universität Jena nicht-nukleophile aprotische organische Elektrolyte für Mg-Batterien präsentiert werden. Die Elektrolyte ermöglichen eine langzeitstabile Reversibilität mit mehr als 2.000 Zyklen von Mg-Plating und Stripping bei vergleichbar hoher coulombischer Effizienz (~99%) sowie oxidativer Stabilität (s. Abb. unten).



// Post-lithium-ion batteries

Lithium-ion is undoubtedly the world-leading battery technology. However, the increasing demand for battery cells with higher performances has triggered the exploration of alternative battery chemistries. At ZSW, a primary objective is to unveil the potential of post-lithium battery cells based on monovalent and divalent cations, such as Sodium (Na), Magnesium (Mg) and Calcium (Ca). The development of post-lithium batteries represents both a long-term and high-risk challenge as well as a huge opportunity. Understanding and solving the fundamental issues of future generations of battery cells might enable increasing their battery life and energy with a better use of material resources, cost reduction and higher consumer/market acceptance of battery-powered products.

ZSW is a partner in several national projects funded by the German Federal Ministry of Education and Research as well as associate partner of the POLiS Cluster of Excellence (DFG) which brings together scientists from the Karlsruhe Institute of Technology, Ulm University and the University of Giessen. Within these projects, we are carrying out research on anode and cathode materials as well as on electrolytes for post-lithium batteries. In this context, and in collaboration with the Friedrich Schiller University Jena, we have recently presented new non-nucleophilic aprotic organic electrolytes for Mg batteries. The electrolytes enable long-term stable reversibility with more than 2,000 cycles of Mg plating and stripping with comparable high coulombic efficiency (~99%) as well as oxidative stability (see fig. below).

// Zyklisches Voltammogramm (CV) einer Mg/Cu-Zelle mit dem neuen nicht-nukleophilen aprotischen organischen Elektrolyten.
 // Cyclic voltammogram (CV) of a Mg/Cu cell with the new non-nucleophilic aprotic organic electrolyte.

// Dr. Mario Marino
 E-mail: mario.marinaro@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-213

// Kobaltfreie Kathoden im Fokus

Innerhalb des Dachkonzepts „Forschungsfabrik Batterie“ werden die Erforschung und Entwicklung neuer Materialkonzepte für zukünftige elektrochemische Energiespeicher vom Bundesforschungsministerium (BMBF) im Kompetenzcluster „ExcellBattMat“ gebündelt, der im Herbst 2019 seine Arbeit aufgenommen hat. Die seit 2012 erfolgreich im Rahmen der BMBF-Förderinitiative „Excellent Battery“ als Kompetenzzentrum Ulm/Stuttgart unter dem Akronym LiEcoSafe (Entwicklung kostengünstiger und sicherer Lithium-Ionen-Batterien – vom Material bis zur Betriebsstrategie) etablierten Arbeiten werden weitergeführt. Das ZSW koordiniert innerhalb des Clusters die Plattform 2 „Lithium-Ionen-Batterie“, in der gemeinsam mit den anderen drei Zentren innovative Materialkonzepte zu einem funktionstüchtigen Gesamtkonzept für Lithium-Ionen-Batterien der nächsten Generation weiterentwickelt werden.

Die weitere Erhöhung der spezifischen Energie bzw. Energiedichte bei gleichzeitiger Reduktion der Kosten ist eine zentrale Herausforderung für die Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Batterien, wobei die Kosten maßgeblich durch die verwendeten Materialien bestimmt werden. Die Arbeiten am ZSW konzentrieren sich daher auf die Entwicklung kobaltfreier Kathodenmaterialien mit signifikant reduziertem Nickelgehalt wie z. B. Hochvoltspinnelle. Ein weiterer Ausbau der Pulversynthese bis in den 10-kg-Maßstab war notwendig, um Mustermengen für Elektrodenbeschichtungen und den Bau von Zellen bereitstellen zu können. Die Inbetriebnahme eines neuen Reaktortyps (Taylor Couette) für die Herstellung sphärischer Kathodenpulver im 10-kg-Maßstab wurde erfolgreich abgeschlossen. Durch gezielte Auswahl und Steuerung der Syntheseparameter konnten bis zu 30 kg des kobaltfreien Precursors für Hochvoltspinnelmuster mit optimiertem Partikeldesign und sehr guten elektrochemischen Eigenschaften erfolgreich hergestellt werden.



// Focus on cobalt-free cathodes

As part of the overarching “Battery Research Factory” idea, research and development of new material concepts for future electrochemical energy storage systems are bundled by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the “ExcellBattMat” competence cluster which began its work in autumn 2019. The work that has been successfully carried out since 2012 as part of BMBF’s “Excellent Battery” funding initiative in the form of the Ulm/Stuttgart competence centre under the acronym LiEcoSafe (development of cost-effective and safe lithium-ion batteries – from the material to the operating strategy) will be carried on. Within the cluster, ZSW coordinates the Plattform 2 “Lithium-ion battery” in which innovative material concepts are further developed into a functional overall concept for next-generation lithium-ion batteries. ZSW collaborates with the other three centres.

Further increasing the specific energy, or energy density, while cutting costs is a central challenge for the development of lithium-ion batteries, while the costs are largely determined by the selected materials. The work at ZSW is therefore focused on developing cobalt-free cathode materials with a significantly reduced nickel content, such as high-voltage spinels. A further expansion of powder synthesis up to the 10 kg scale was necessary to provide the sample quantities required for electrode coating and cell assembly. The commissioning of a new type of reactor (Taylor Couette) for the production of spherical cathode powders on a 10 kg scale was a success. By carefully selecting and controlling the synthesis parameters, up to 30 kg of cobalt-free precursor for high-voltage spinel samples with an optimised particle design and very good electrochemical properties was produced successfully.

// Kobaltfreies Kathodenmaterial unter dem Rasterelektronenmikroskop.
 // Cobalt-free cathode material imaged with a scanning electron microscope.

// Dr. Peter Axmann
 E-mail: peter.axmann@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-404

// Produktionsforschung (ECP) Production Research (ECP)

// Unsere Kernkompetenzen

Die serienmäßige Produktion großer Lithium-Ionen-Zellen, wie sie auch in Elektroautos oder in stationären Speichern verwendet werden, stellt besondere Anforderungen an die Präzision und Zuverlässigkeit der Prozesse: Je höher deren Qualität und Reproduzierbarkeit werden, desto zuverlässiger, langlebiger und kostengünstiger wird der Speicher.

Kernaufgabe ist es, im Rahmen von Industrienaufträgen und Forschungsvorhaben industrielle Produktionsprozesse zu optimieren oder fortschrittliche Zellchemie in Mustersonnen von Standardzellen zu verifizieren. Hierfür betreibt das Fachgebiet seit sechs Jahren eine europaweit einmalige „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen“ (FPL), d. h. Hardcase-PHEV-1-Zellen > 25 Ah, wie sie in Elektrofahrzeugen oder zur Speicherung von erneuerbarer Energie zum Einsatz kommen. Untersuchungen zum Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten sowie Fragen zu Inline-Sensorik, zu Fertigungstoleranzen oder zu kosteneffizienten Abläufen stehen im Zentrum. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um die Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrie-relevanten Maßstab.

Die Forschungskompetenz des Teams umfasst alle produktions-nahen Fragestellungen, von der Anlagenentwicklung über die Verbesserung von Einzelschritten bis zu den Qualitätssicherungsverfahren. Durch die vielfältigen Möglichkeiten der seriennahen Prozess- und Produktionsforschung und des bereits gesammelten Erfahrungsschatzes ist die FPL integraler Bestandteil im Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ des Bundesforschungsministeriums für den Aufbau einer Batteriezellproduktion in Deutschland. Dieser Erfolg ist ein Beleg für die Exzellenz der Batterieforschung am ZSW.

// Our main focus

The mass production of large lithium-ion cells, such as those used in electric cars or stationary storage systems, places special demands on the precision and reliability of the processes: the higher their quality and reproducibility, the more reliable, durable and cost-effective the storage system becomes.

The core ECP task is to optimise industrial production processes and verify advanced cell chemistry in a series of samples of standard cells as part of industrial contracts and research projects. For this purpose the department has been operating a “Research platform for the industrial production of large-scale lithium-ion cells” (FPL), i.e., hard-case PHEV-1 cells > 25 Ah as used in electric vehicles or for storing renewable energy, which is unique in Europe. Research into the interplay of cell chemistry, cell design and manufacturing technology with regard to quality, safety and manufacturing costs as well as questions concerning in-line sensor technology, manufacturing tolerances and cost-efficient processes are the focus. In terms of new materials and components, the focus is on evaluating processability and quality on a scale relevant to the industry.

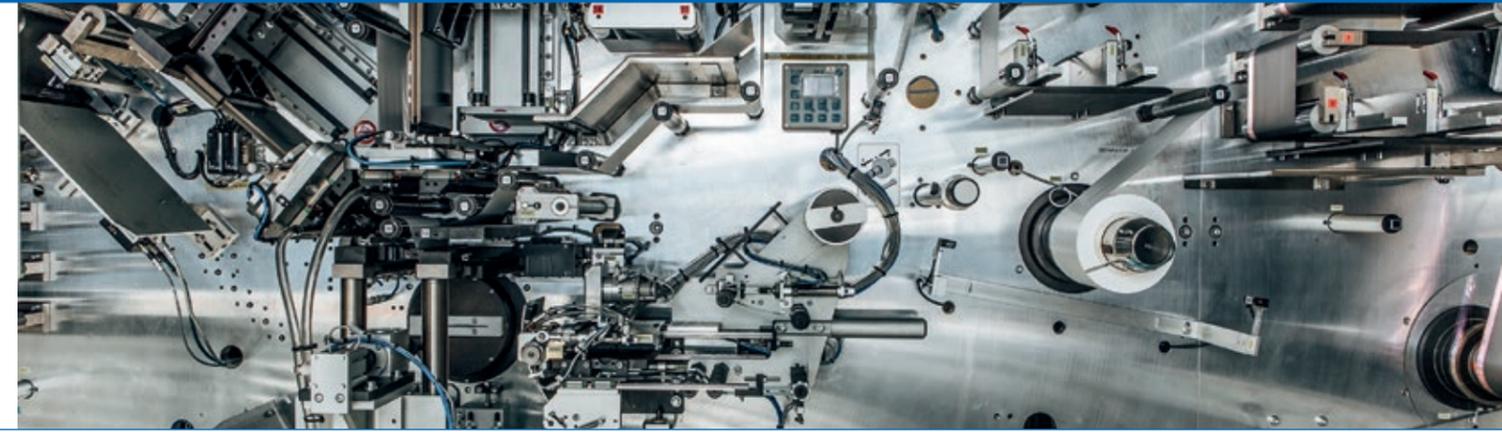
The team’s research expertise covers all production-related issues, from plant development and the improvement of individual steps to quality assurance procedures. FPL is an integral part of the umbrella concept “Battery Research Factory” of the German Federal Ministry of Education and Research for the establishment of battery cell production in Germany thanks to the wide range of opportunities for near-series process and production research and the wealth of experience already gathered. This success is proof of the excellence of battery research at ZSW.



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

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

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



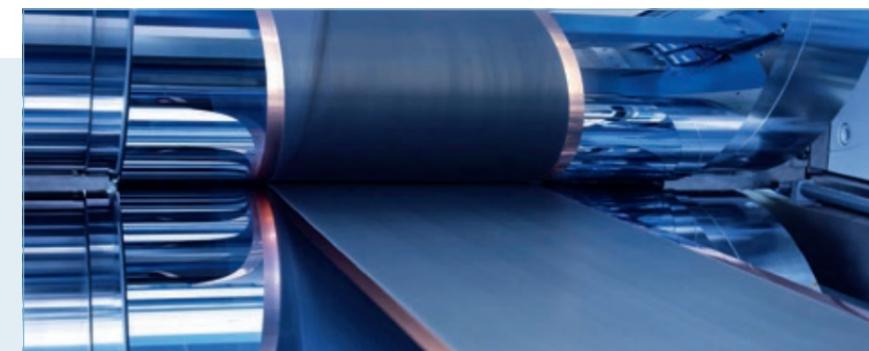
// Herstellung von Elektroden-Wickeln für prismatische PHEV-1-Zellen.
// Production of electrode windings for PHEV-1 cells.

// Industrielle Produktionsprozesse entwickeln und optimieren

Im vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt „Validierung der Herstellprozesse für formatflexible Lithium-Ionen-Zellen (KomVar)“ wird gemeinsam mit den Industriepartnern und den assoziierten Partnern eine formflexible Demonstrator-Zellfertigungslinie für Lithium-Ionen-Batteriezellen am Produktionsstandort aufgebaut. Die Anlagen sollen in der Lage sein, verschiedene Zelldesigns und Zelltechnologien in Großserienqualität trotz kleiner und mittlerer Stückzahlen zu fertigen. Das ZSW bringt seine langjährigen Erfahrungen in der Lithium-Ionen-Technologie und in der Entwicklung seriennaher Produktionsprozesse für großformatige Lithium-Ionen-Zellen in das Vorhaben ein. Produktionskennzahlen wie Durchsatz, Ausschuss, Reproduzierbarkeit und Qualität werden bei der Anlagenevaluation aufgenommen, ausgewertet und vergleichend gegenübergestellt. Die Erkenntnisse fließen in die Entwicklung geeigneter Qualitätskonzepte und in die Prozessoptimierung ein.

Für die Reichweitensteigerung von Elektrofahrzeugen ist aufgrund des zumeist begrenzten Bauraums eine Erhöhung der Energiedichte der Batterien unumgänglich. Im kürzlich gestarteten, vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt „Höhere Energiedichte durch optimierte Herstellprozesse (MiKal)“ soll daher in Zusammenarbeit mit weiteren Forschungsinstituten eine Steigerung der Zellperformance und der Energiedichte durch optimierte Misch- und Kalandrierprozesse realisiert werden. Um dies zu erreichen, werden auf Materialebene einerseits Konzepte zur Herstellung hochkapazitiver Elektroden mit hoher Massenbeladung unter industriellen Bedingungen erarbeitet, andererseits können ergänzend DEM-Simulationsmodelle zur Vorhersage der strukturellen Produktgestaltung und Prozessauslegung entwickelt werden.

// Verdichten von Batterie-Elektroden an der Forschungsproduktionslinie (FPL) durch Kalandrieren.
// Compacting battery electrodes at the research production line (FPL) by calendering.



// Developing and optimising industrial production processes

The “Validation of manufacturing processes for format-flexible lithium-ion cells (KomVar)“ project, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, is setting up a form-flexible demonstrator cell manufacturing line for lithium-ion battery cells at the production site together with industry and associated partners. The facilities are designed for the manufacture of various cell designs and cell technologies in large-scale production quality despite small and medium quantities. ZSW is contributing its many years of experience in lithium-ion technology and in the development of near-series production processes for large-format lithium-ion cells to the project. Key production figures such as through-put, rejects, reproducibility and quality are recorded, evaluated and compared during the system evaluation. The findings will be used to develop suitable quality concepts and optimise processes.

In order to increase the range of electric vehicles, it is crucial to increase the energy density of the batteries due to the usually limited installation space. In the recently launched “Higher energy density through optimised manufacturing processes (MiKal)“ project, funded by the German Federal Ministry of Education and Research, an increase in cell performance and energy density will therefore be realised through optimised mixing and calendering processes in cooperation with other research institutes. In order to achieve this, concepts for the production of high-capacity electrodes with high mass loading under industrial conditions are being developed at the materials level. In addition, DEM simulation models can be developed to predict both structural product design and process layout.

// Contact KomVar: Stefan Mähr
E-mail: stefan.maehr@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-354

// Contact MiKal: Dr. Hai Yen Tran
E-mail: hai-yen.tran@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-345

// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECA betreibt ein Batterietestfeld und untersucht elektrochemische Energiespeichersysteme bis 1.000 V und 360 kW. Akkumulatoren sollen auch unter schwierigsten Bedingungen sicher und leistungsfähig sein. Daher steht deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen und die Untersuchung des Verhaltens im Fehlerfall oder in Unfallsituationen im Mittelpunkt der Arbeiten. Die betrachteten Einsatzbereiche der Batterien umfassen die portable und stationäre Energiespeicherung und insbesondere den Einsatz in elektrifizierten Antriebssträngen von Fahrzeugen – ob zu Land, zu Wasser oder für die Luftfahrt.

Im elektrischen Batterietest werden Zellen, Module und Systeme beispielsweise auf Funktionalität geprüft, deren Leistungsfähigkeit vermessen und die zu erwartende Lebensdauer bestimmt. Mittels zerstörender Tests werden Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie deren Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen beurteilt. Schwerpunkte bilden dabei die Unterdrückung der Fehlerausbreitung im System (thermische Propagation) und die Brandlöschung.

Herzstück der Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Modellierung und Simulation von Zellen und Batteriesystemen inklusive der Algorithmen für den Batteriezustand und das -management. 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 main focus

The ECA department operates a battery test field and researches electrochemical energy storage systems up to 1,000 V and 360 kW. Batteries should be safe and efficient even under the most difficult of conditions. This is why we characterise batteries under different operating conditions and analyse their behaviour in the event of a fault or in accident situations. The areas of battery application under consideration include portable and stationary energy storage and, in particular, use in the electrified drive trains of vehicles – whether on land, water or for aviation.

In the electrical battery test, cells, modules and systems are tested in terms of functionality, their performance is measured and the expected service life is determined. Destructive tests are carried out to assess the hazard potential of batteries in the event of extreme damage as well as their resistance to various conditions of misuse. Emphasis is placed on suppressing fault propagation within the system (thermal propagation) and fire extinguishing.

The heart of battery system engineering is the thermal and electrical modelling and simulation of cells and battery systems, including algorithms for battery condition and management. Research is also being conducted into optimal charging control under fast-charging conditions and the influence of ripple currents and mechanical compression forces on performance, expected service life and safety.

// ZSW-Barrieren verhindern Propagation in Lithium-Ionen-Batterien

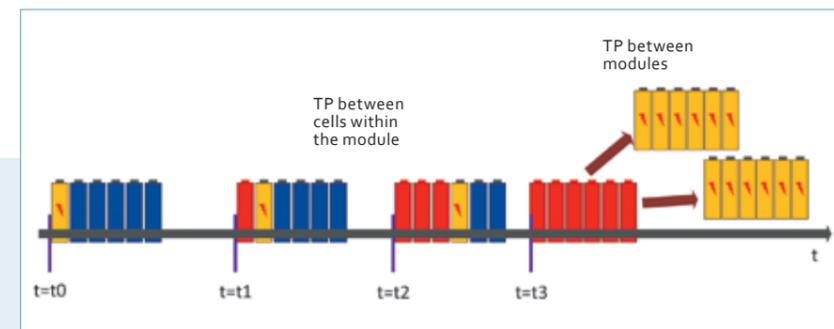
Die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektrofahrzeugen steigt aufgrund der Reichweitenanforderungen stetig und erfordert damit erweiterte Sicherheitskonzepte. Heutzutage führt das Batteriemanagementsystem (BMS) eine Vielzahl von sicherheitsrelevanten Algorithmen innerhalb des Energiespeichers aus. Jedoch kann das BMS nicht umfassend alle Bedingungen einschränken, die zu einem sogenannten thermischen Durchgehen einer Einzelzelle führen können. Beispiele dafür sind nicht entdeckte Zellproduktionsfehler sowie mechanische Beschädigungen des Separators oder der Zelle. Ein thermisches Durchgehen einer Einzelzelle führt meist zu einer thermischen Propagation (TP), die den gesamten Energiespeicher erfasst. Daher ist eine zusätzliche hardwareseitige Unterstützung der Batteriesicherheit durch Propagationsschutzbarrieren wichtig.

Das ZSW entwickelt seit Jahren diese Art von Barrieren. Nachdem es in den vergangenen Jahren gelang, den Ablauf einer Propagation detaillierter zu verstehen, konnten wir die Fortpflanzung des thermischen Durchgehens im Minutenbereich verzögern. Das ist auch der heutige Stand der Technik bei kommerziellen Barrieren. Mit einem neuen Ansatz ist es uns gelungen, über den Stand der Technik deutlich hinauszugehen. Mit einer 1,5 mm dicken Barriere konnte die Ausbreitung des thermischen Durchgehens einer Einzelzelle auf die Nachbarzelle sowohl in Modulen mit zwei Zellen als auch in Modulen aus drei verschweißten Zellen auf einer Kühlplatte vollständig und nachhaltig verhindert werden (s. Abb. unten). Für diese Untersuchungen wurden 40-Ah-Zellen auf Basis einer NMC-1:1:1/Graphit-Chemie eingesetzt.

// ZSW barriers prevent propagation inside lithium-ion batteries

The energy density of lithium-ion batteries in electric vehicles is steadily rising due to range requirements and thus requires advanced safety concepts. Today, the battery management system (BMS) runs a variety of safety-relevant algorithms within the energy storage device. However, the BMS cannot comprehensively constrain all conditions that could lead to a so-called thermal runaway in a single cell. Examples include undetected cell production defects and mechanical damage to the separator or the cell. Thermal runaway in a single cell usually leads to thermal propagation (TP) that affects the entire energy storage device. This is why we are developing propagation protection barriers as additional hardware support for battery safety.

ZSW has been developing this type of barrier for several years. After we succeeded in understanding the course of a propagation event in more detail over the past few years, we were able to delay the propagation of thermal runaway within the range of minutes. This is also the current state of the art for commercial barriers. We have succeeded in going significantly beyond the state of the art with a new approach. With a 1.5 mm-thick barrier, the spread of thermal runaway in a single cell to the neighbouring cell, both in modules with two cells and in modules consisting of three welded cells, could be completely and sustainably prevented on a cooling plate (see fig. below). 40 Ah cells based on an NMC 1:1:1/graphite chemistry were used for these tests.



// Schematische Darstellung, wie mit einer 1,5 mm dicken Barriere thermisches Durchgehen in Batterien verhindert werden kann.
// Schematic representation of how thermal runaway in batteries can be prevented with a 1.5 mm-thick barrier.



„Trotz schwieriger Randbedingungen aufgrund der Covid-19-Pandemie waren wir auch dieses Jahr wieder ein verlässlicher Partner für unsere Kunden aus Industrie und Forschung.“

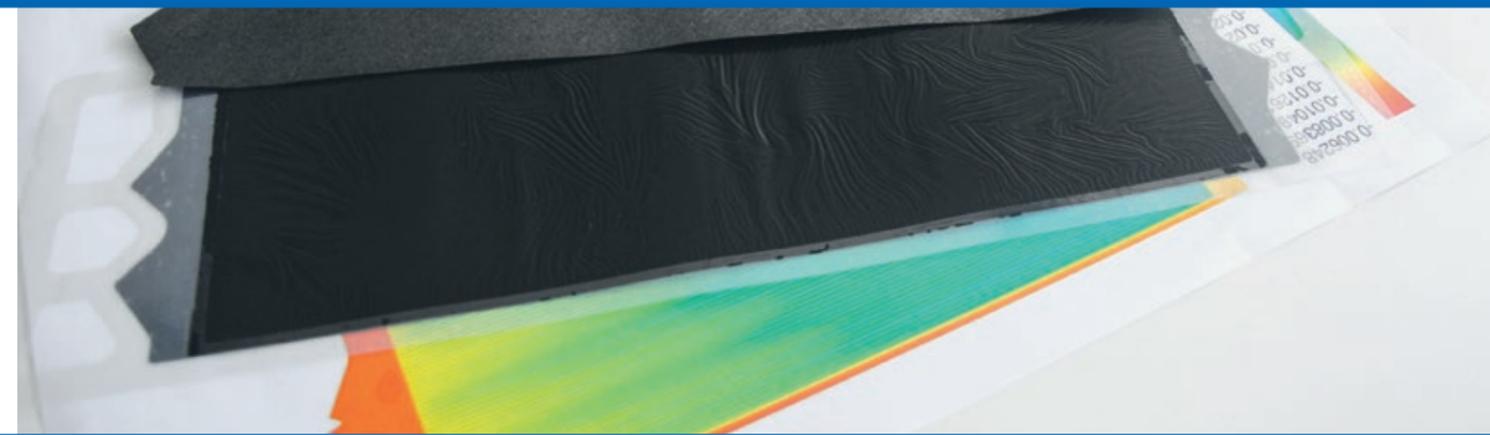
// Dr. Olaf Böse, Head of Department
E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-551

“Despite difficult circumstances due to the Covid-19 pandemic this year, we were once again a reliable partner for our industry and research clients.”

// Dr. Marius Bauer
E-mail: marius.bauer@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-588

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)



// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECG untersucht schwerpunktmäßig Elektroden in Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC), Elektrolyseuren und elektrochemischen Speichern mit wässrigem Elektrolyt. Ziel der Arbeiten ist es, die Leistungsdichte und Lebensdauer zu steigern sowie Kosten zu reduzieren. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen an Modellelektroden und Modellzellen. Sie werden durch mathematische Modellierungen und Simulationen unterstützt sowie mittels Tests in großformatigen Brennstoffzellen und Brennstoffzellen-Stacks in Kooperation mit anderen ZSW-Fachgebieten verifiziert. Zur detaillierten Bestimmung der Zusammensetzung der Elektrodenmikrostruktur von Brennstoffzellen und Batterien – sowohl im Neuzustand als auch im Verlauf der Betriebsdauer – kommen die hochauflösende Bildgebung über Elektronenmikroskopie sowie tomographische Methoden zum Einsatz.

Das ECG-Team verfügt über langjährige Erfahrung und die nötige Infrastruktur, um auch ganz neue technologische Ansätze aufzugreifen und schnell im Labor zu verifizieren und demonstrieren. Ein Beispiel sind konsequente Arbeiten zur Optimierung von Material- und Elektrodenzusammensetzung sowie an der Elektrodenmikrostruktur, durch die es gelungen ist, die Leistung von Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) für PEFC bei hohen Stromdichten zu steigern. Ein anderes Beispiel ist die Einführung von Mikrowellensynthese-Methoden. Damit können wir Katalysatoren für Brennstoffzellen oder Aktivmaterialien für wässrige Batterien in einer großen Variantenbreite und in kurzer Zeit herstellen.

Durch ausgedehnte grundlegende Untersuchungen konnte ein Verfahren entwickelt werden, um die Ausbildung, den Leitfähigkeitsmechanismus und die Stabilität von Deckschichten auf Edelstählen zu untersuchen, die als Basismaterialien für Bipolarplatten in PEFC eingesetzt werden.

// Our main focus

The ECG department studies electrodes in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEFC), electrolysers and electrochemical storage systems with an aqueous electrolyte. The aim is to increase power density and service life while lowering costs. Experimental analyses are performed on model electrodes and model cells. They are supported by mathematical models and simulations and are verified through tests in large-scale fuel cells and fuel cell stacks in cooperation with other ZSW departments. High-resolution imaging via electron microscopy and tomographic methods are used to determine the composition of the electrode microstructure of fuel cells and batteries in greater detail – both in their new condition and over the course of their operating life.

The ECG team can draw on many years of experience and the requisite infrastructure to adopt entirely new technological approaches and quickly verify and demonstrate them in the laboratory. One example includes the systematic work on electrode microstructure and on optimising the composition of materials and electrodes which has made it possible to increase the performance of membrane electrode assemblies (MEAs) for PEFC at high current densities. Another example is the introduction of microwave synthesis methods.

These methods allow us to produce catalysts for fuel cells or active materials for aqueous batteries in a wide range of variants and in a short time. Through extensive fundamental investigations, we were able to develop a method to study the formation, conductivity mechanism and stability of cover layers on stainless steel used as the base material for bipolar plates in PEFC.

// Neue Membran-Elektroden-Einheiten für fahrzeugtaugliche Brennstoffzellen

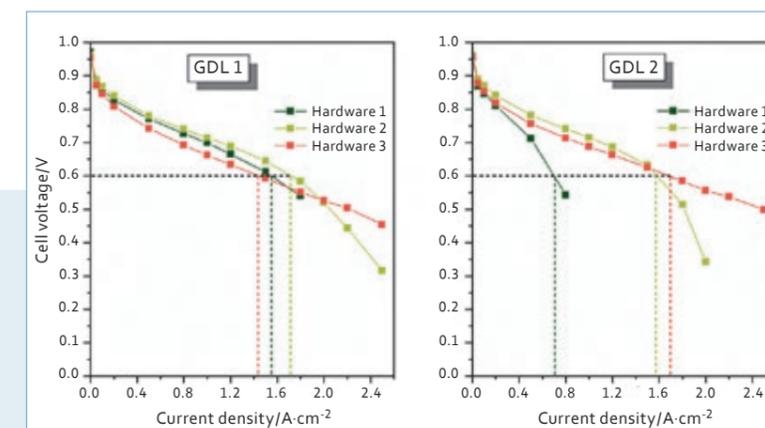
Im von der Europäischen Union geförderten Projekt „Next Generation Automotive membrane electrode Assemblies (GAIA)“ besteht die Aufgabe des ZSW darin, Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten in einer Brennstoffzelle zu untersuchen sowie Leistungs- und Lebensdauer tests an verschiedenen von Industriepartnern bereitgestellten Brennstoffzellen-Stacks durchzuführen.

Erste Tests an Brennstoffzellen mit unterschiedlichen Gasdiffusionslagen (GDL) zeigten eine unerwartet starke Abhängigkeit der Zell-Leistungscharakteristik bei hohen Stromdichten je nach Kombination des Gasverteilerfeldes und Graphitisierungsgrad der Gasdiffusionslage. Die Abbildung unten zeigt einen Vergleich der Leistungscharakteristik von Membran-Elektroden-Einheiten mit nicht graphitisierter Gasdiffusionslage (GDL 1) und graphitisierter Gasdiffusionslage (GDL 2), die in Zellen mit verschiedenen Gasverteilerfeldern unter feuchten Betriebsbedingungen aufgenommen wurden. Man erkennt in Hardware 1 und 2 ein deutliches Abknicken der Strom-Spannungskurve bei hohen Stromdichten, was auf Stofftransporthemmungen durch Wechselwirkungen der Gasdiffusionslagen mit den Gasverteilerfeldern hindeutet. In Hardware 3 hingegen verläuft die Strom-Spannungskurve bei höheren Spannungen. Die beschriebene Sensitivität kann auf Schwierigkeiten beim Austrag von Flüssigwasser vor allem in Hardware 1 zurückgeführt werden. Dieser Befund wird durch Betrieb bei höherer Temperatur und geringerer Gasbefeuchtung bestätigt.

// New membrane electrode assemblies for automotive fuel cells

In the “Next Generation Automotive membrane electrode Assemblies (GAIA)“ project funded by the European Union, ZSW’s role is to investigate interactions between the individual components in a fuel cell and to carry out performance and lifetime tests on various fuel cell stacks provided by industry partners.

The first tests with fuel cells with different gas diffusion layers (GDL) revealed an unexpectedly strong dependence of cell performance characteristics at high current densities depending on the combination of the gas distribution field and the degree of graphitisation of the gas diffusion layer. The figure below shows a comparison of the performance characteristics of membrane electrode assemblies with a non-graphitised gas diffusion layer (GDL 1) and a graphitised gas diffusion layer (GDL 2) recorded in cells with different gas distribution arrays under humid operating conditions. In Hardware 1 and 2, there is a clear drop in the current-voltage curve at high current densities, which indicates mass transport inhibitions due to interactions of the gas diffusion layers with the gas distribution fields. In Hardware 3, on the other hand, the current-voltage curve is at higher voltages. The described sensitivity can be attributed to difficulties in discharging liquid water, especially in Hardware 1. This finding is confirmed by comparing operation at a higher temperature and lower gas humidification.



// Vergleich der Strom-Spannungskurven bei Verwendung von Einzelzellen mit verschiedenen Gasverteilerstrukturen. GDL 1: nicht graphitisiert, GDL 2: graphitisiert.
// Comparison of current-voltage curves when using single cells with different gas distribution structures. GDL 1: not graphitised, GDL 2: graphitised.



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

“We research and develop new materials and components for fuel cells, electrolysers, high-performance storages and metal-air cells.”

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

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

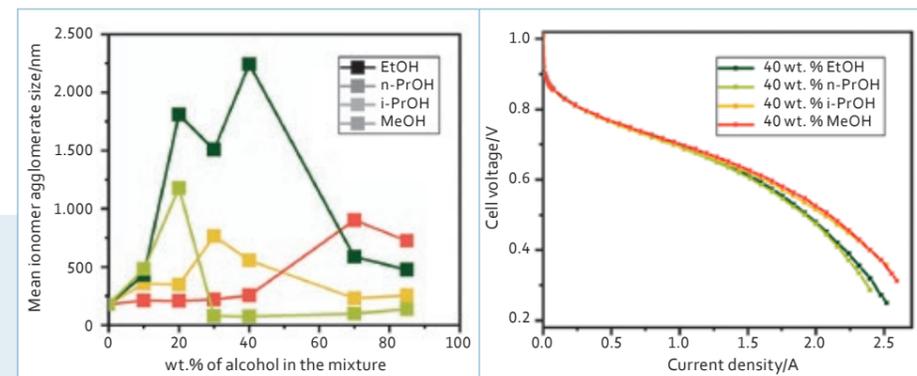


// Nanostrukturierte Elektrokatalysatoren für Brennstoffzellen

Im deutsch-französischen und vom Bundesforschungsministerium geförderten Forschungsprojekt BRIDGE* werden unter Koordination des ZSW Elektroden für Brennstoffzellen mit modernen, nanostrukturierten Elektrokatalysatoren entwickelt. Sie sollen eine hohe Aktivität und exzellente Stofftransporteigenschaften bei minimalem Edelmetallbedarf verbinden.

Aufgabe des ZSW ist es, die Leistungscharakteristik von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) bei hohen Stromdichten durch geringere Stofftransportverluste in der Katalysatorschicht zu optimieren. Ein Ansatz dazu ist die Optimierung der bei der Elektrodenherstellung eingesetzten Katalysatorfarbe. Diese besteht im Wesentlichen aus einer Dispersion des Katalysatorpulvers und eines protonenleitenden Polymers (Ionomer) in einer Mischung aus Alkohol und Wasser. In einer ersten Versuchsserie wurde der Einfluss des Alkoholgehalts und der Art des Alkohols auf die Größe der Ionomerpartikel in der Dispersion untersucht. Die linke Abbildung zeigt die starke Abhängigkeit der Partikelgröße in der Ionomerdispersion von der Konzentration und der Art des Alkohols im Dispergierungsmittel.

Ferner wurden Kathoden-Katalysatorfarben verschiedener Zusammensetzung mittels einer Ultraschalldüse auf Elektrolytmembranen aufgebracht. Die rechte Abbildung zeigt die resultierenden Strom-Spannungskurven und wie die Art des Alkohols deutlichen Einfluss auf die Spannungslage bei hohen Stromdichten ausübt, in denen der Sauerstoff-Stofftransport leistungsbegrenzend wird.



// Abhängigkeit der Partikelgröße einer Ionomerdispersion in Alkohol-Wasser-Gemischen (li.) sowie Strom-Spannungskurven von MEAs mit unterschiedlich zusammengesetzter Kathoden-Katalysatorfarbe (re.).
// Dependence of particle size of an ionomer dispersion in alcohol-water mixtures (left) and current-voltage curves of MEAs with differently formulated cathode catalyst inks (right).

// Nanostructured electrocatalysts for fuel cells

Electrodes for fuel cells with modern, nanostructured electrocatalysts are being developed under the coordination of ZSW in the German-French research project BRIDGE*, funded by the German Federal Ministry of Education and Research. The goal is to combine high activity and excellent mass transport properties with minimal precious metal requirements.

ZSW's task is to optimise the performance characteristics of membrane electrode assemblies (MEAs) at high current densities by reducing mass transport losses in the catalyst layer. One approach is to optimise the catalyst ink employed in electrode production. This primarily consists of a dispersion of the catalyst powder and a proton-conducting polymer (ionomer) in a mixture of alcohol and water. The impact of the alcohol content and the type of alcohol on the size of the ionomer particles in the dispersion was investigated in a first series of experiments. The figure on the left shows the strong dependence of the particle size in the ionomer dispersion on the concentration and type of alcohol in the dispersant.

Furthermore, cathode catalyst inks of varying compositions were applied to electrolyte membranes using an ultrasonic nozzle. The figure on the right shows the resulting current-voltage curves and how the type of alcohol has a pronounced influence on the voltage at high current densities, where oxygen mass transport becomes the power-limiting factor.

* BRIDGE = Bridging the environmental Gap: promising catalyst materials to performant fuel cells Electrode.

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

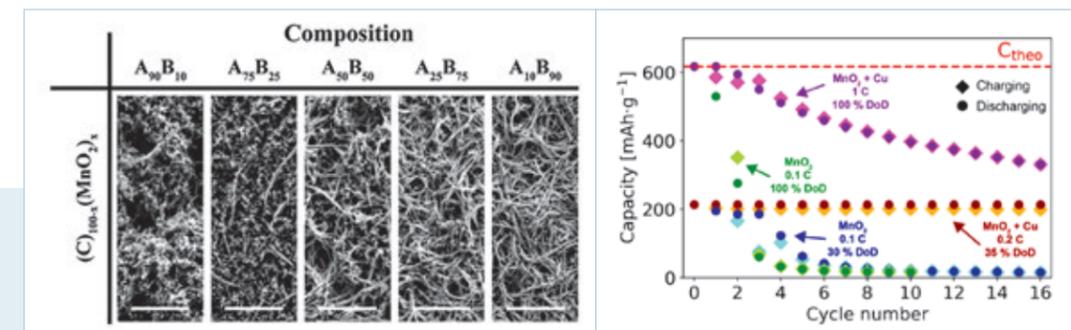
// Reversible alkalische Zink-Mangandioxidbatterie für stationäre Energiespeicher

Das vom Bundesforschungsministerium geförderte Projekt RAMSES* hat die Entwicklung einer elektrisch aufladbaren Zink-Mangandioxid-Zelle (Zn-MnO₂) zum Ziel.

Zur Erhöhung der Zyklenzahl wurde ein am ZSW hergestelltes α-MnO₂ mit Kupfer (Cu) dotiert, wodurch eine signifikante Verbesserung des Lade-Entlade-Wirkungsgrads bei hohen Entladeraten und Entladetiefen erreicht wurde. Die Abbildung unten rechts zeigt den weitgehenden Erhalt der Elektrodenkapazität einer Zelle mit kupferdotierter Elektrode bei einer Entladetiefe von 35%, wohingegen kupferfreie Elektroden ihre Kapazität bereits nach wenigen Zyklen eingebüßt haben. Selbst bei 100% Entladetiefe konnte die Zelle über mehrere Zyklen betrieben werden.

In einer weiteren Untersuchung wurden verschiedene Prozeduren zur Beladung des Stromsammlers aus Nickelschaum mit Aktivmaterial untersucht. Durch eine im Haus entwickelte kostengünstige Methode konnte das Projektziel bereits nach einem Jahr erreicht werden. Weitere, grundlagenorientierte Untersuchungen zielen auf ein besseres Verständnis der elektrochemischen Ladungsspeicherung in dotierten MnO₂-Materialien, die langfristig ein gezieltes Material- und Elektroden-design zur Erhöhung der Zyklenfestigkeit der MnO₂-Elektrode ermöglichen.

Das gemeinsame Forschungsprojekt zwischen deutschen und französischen Wissenschaftlern soll u. a. die europäische Energieversorgung effizienter und nachhaltiger machen.



// Entwicklung der spezifischen Kapazität Cu-dotierter und undotierter α-MnO₂-Elektroden mit der Zyklenzahl.
// Evolution of the specific capacity of Cu doped and undoped α-MnO₂ electrodes with cycle number.

// Reversible alkaline zinc-manganese dioxide battery for stationary energy storage

The RAMSES* project, funded by the German Federal Ministry of Education and Research, aims to develop an electrically rechargeable zinc-manganese dioxide (Zn-MnO₂) cell.

To increase the cycle number, α-MnO₂ produced at ZSW was doped with copper (Cu) leading to a significant improvement in the charge-discharge efficiency at high discharge rates and discharge depths. The figure below right depicts the high degree of preservation in the electrode capacity of a cell with a copper-doped electrode at a discharge depth of 35%, whereas copper-free electrodes have already lost their capacity after just a few cycles. Even at a 100% discharge depth, the cell could be operated for several cycles.

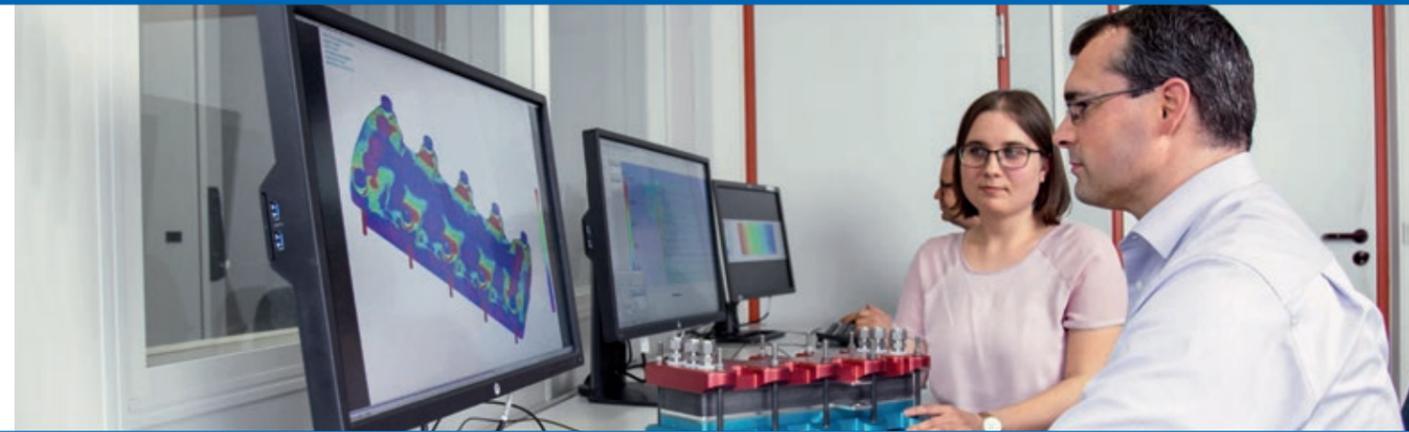
In another trial, different procedures for loading the nickel foam current collector with active material were investigated. The goal of the project was achieved after only one year using a cost-effective method developed in-house. Further investigations oriented around basic research aim for a better understanding of the electrochemical charge storage in doped MnO₂ materials, which in the long term will allow a targeted material and electrode design to increase the cycle stability of MnO₂ electrodes.

The joint research project between German and French scientists aim to support the European energy supply system in becoming more efficient and sustainable.

*RAMSES = Reversible Alkaline zinc – Manganese dioxide battery for Stationary Electricity Storage

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

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



// Unsere Kernkompetenzen

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

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

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels modernster Simulationsverfahren ein. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden (GDL) und Gasverteilerstrukturen mittels einer μ -CT-Anlage untersucht und validiert. Mit der μ -CT-Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden. Ergänzend stehen am ZSW vorhandene Analysetechniken (z. B. FIB-SEM) sowie mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Verfügung, deren zeitliche und räumliche Auflösungen zu den weltweit besten gehören.

// Our main focus

The ECB research department specialises in the development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC). The focus is on the design, characterisation and simulation of fuel cell stacks and components in the power range of a few watts to 100 kW_{el}. Another core competence is the construction of prototypes and the development of manufacturing and testing technologies.

We optimise the output, service life, efficiency and compactness of fuel cells. Among other things, this includes investigating and forecasting ageing processes and error analyses. ECB also develops manual and automated manufacturing technologies for PEMFC components, cells and stacks, including automotive-grade fuel cells.

Modelling and simulating processes in fuel cells enable us to rapidly optimise component structures and operating conditions. This also includes the development and establishment of completely new approaches using advanced simulation software. The simulation results are verified using meaningful hardware and conducting experiments under realistic conditions. For example, the water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using a μ -CT system. This system also enables GDL structures, including their water content, to be investigated under compression. In addition, analytical methods available at ZSW (for example, FIB-SEM) as well as neutron and synchrotron radiography and tomography techniques developed with the Helmholtz Centre Berlin (HZB) are available. The spatial and temporal resolution of these techniques rank among the best in the world.

// 2-Phasen-Strömungssimulationen zum Druckverlust in Brennstoffzellen

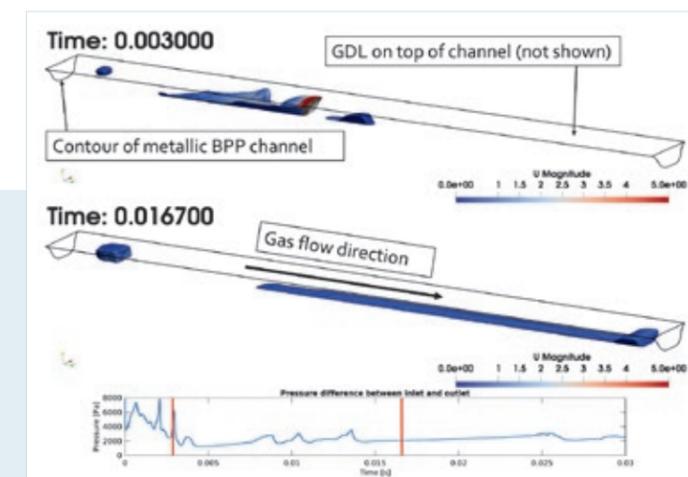
Die hohen Leistungsanforderungen an automobile Brennstoffzellendesigns führen zu einer gegenüber älteren Generationen wesentlich erhöhten Bildung von Flüssigwasser bei gleichzeitig sehr schnellen Gasströmungen in den Kanälen der Bipolarplatte (BPP). Daraus resultiert ein kompliziertes Zusammenwirken von z. B. Tropfen-, Pfropfen- und Filmströmung. Letztlich verursacht dies einen deutlich erhöhten Druckverlust der Zelle, der aber aus Gründen der Effizienz des Brennstoffzellensystems unerwünscht ist.

Dieser zusätzliche Druckverlust muss beim Design der Zelle bereits berücksichtigt werden, ist aber mit üblichen einfachen Zweiphasen-Modellen in Strömungssimulationen nicht erfassbar. Explizite Zweiphasen-Modelle wie das Volume-of-Fluid-(VOF)-Modell erlauben dagegen die genaue Abbildung der Realität. Aufgrund des hohen erforderlichen Rechenaufwands müssen die Simulationen teilweise auf mehreren Hundert Rechnerkernen parallelisiert werden. Mit einer systematischen Studie im Rahmen des vom Bundesverkehrsministerium geförderten Projekts AutoStack Industrie wurde am ZSW untersucht, wie verschiedene Modellparameter (Netzfeinheit, Zeitaufösung) zu wählen sind, um die Realität korrekt abzubilden. Auf dieser Basis wird der Einfluss der Kanalform und Benetzbarkeit auf den zu erwartenden Druckverlust bestimmt. Die Abbildung unten zeigt zwei Zeitpunkte aus solchen Simulationen. Das Wasser gelangt als Tropfen aus der Gasdiffusionslage (GDL) in den Kanal (links oben), vereinigt sich zu größeren, sich schnell bewegenden Ansammlungen, die zu einem kurzfristig erhöhten Druckverlust führen und letztlich einen Film bilden.

// 2-phase flow simulations for pressure loss in fuel cells

The high performance requirements imposed on automotive fuel cell designs cause a significantly increased build-up of liquid water compared to older generations, accompanied by very rapid gas flows in the channels of the bipolar plate (BPP). This results in a complicated interaction of flows between droplets, plugs and films. In the end, it causes a significantly increased pressure loss in the cell, which is unfortunate in terms of fuel cell efficiency.

This additional pressure loss has to be taken into account when designing the cell, but it cannot be determined with the usual simple two-phase models in flow simulations. Explicit two-phase models such as the Volume of Fluid (VOF) model, on the other hand, allow for an exact representation of reality. The simulations must sometimes be parallelised on several hundred computer cores due to the extreme computational power required. With a systematic study within the AutoStack-Industrie project funded by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, ZSW investigated how different model parameters (mesh fineness, temporal resolution) should be selected in order to correctly reproduce reality. The influence of channel shape and wettability on the expected pressure drop is determined based on this. The image below shows two instances of such simulations. Water enters the channel (top left) in the form of droplets from the gas diffusion layer (GDL) and coalesces into larger fast-moving accumulations that lead to a short-term increase in pressure loss, ultimately forming a film.



// Wasser in der Luftströmung in einem Kanal der Kathoden-Bipolarplatte einer Brennstoffzelle zu zwei Zeitpunkten während der VOF-Simulation. Die Farbskala zeigt die Bewegungsgeschwindigkeit in m/s. Unten im Bild: Druckverlust im Kanal über die Zeit.
// Water in the air flow inside a channel of the bipolar cathode plate of a fuel cell at two points in time during the VOF simulation. The coloured scale shows the speed of movement in m/s. Below: pressure loss in the channel over time.

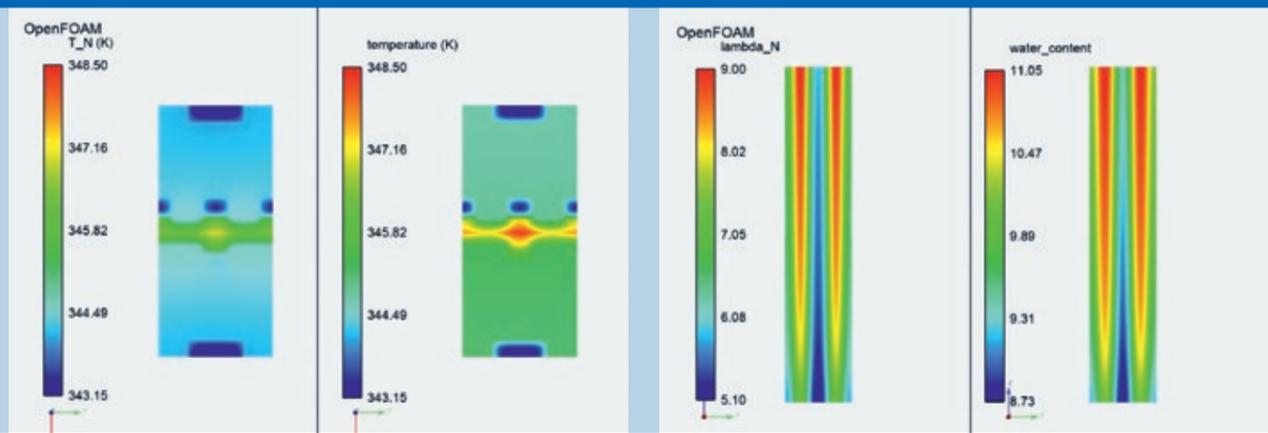


„Im Mittelpunkt unserer Arbeit steht die Optimierung von Brennstoffzellen mit allen ihren Komponenten in Bezug auf Design, Fertigung, Leistung und Lebensdauer.“

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

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

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



// Open-Source-Vollzell-CFD-Simulationsmodell für PEM-Brennstoffzellen

Die Entwicklung leistungsfähiger Polymerelektrolytmembran-(PEM-) Brennstoffzellen erfordert es, das Verhalten der Zellen möglichst genau vorherzusagen. Als Werkzeug hierfür eignen sich u. a. Vollzell-CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics). In diesen werden neben der üblichen Strömungsmechanik auch die elektrochemischen Reaktionen, die Stromleitung sowie die Wärme-erzeugung und -abführung berücksichtigt. Derartige Modelle setzt das ZSW als Teil kommerzieller Softwarepakete erfolgreich ein.

Allerdings haben diese kommerziellen Softwarelösungen den Nachteil, dass die Umsetzung neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse durch den Nutzer nur eingeschränkt möglich ist. Auf der anderen Seite bieten quelloffene Modelle genau diese Möglichkeit. Sie konnten bei der Vorhersagegenauigkeit bisher jedoch nicht mit ihren kommerziellen Pendanten mithalten.

Daher entwickelte das ZSW eines der vorhandenen Modelle zu einem möglichst generellen quelloffenen Vollzellmodell weiter und baut dabei auf dem bereits bewährten freien CFD-Paket OpenFOAM® auf. Die Arbeiten im Rahmen des Projekts AutoStack Industrie (gefördert vom Bundesverkehrsministerium) haben bereits vielversprechende Ergebnisse erbracht. Die Abbildung unten vermittelt einen Eindruck davon, anhand einer automobiltauglichen Kanalgeometrie. Nur in der resultierenden Stromdichteverteilung sind noch Unterschiede zur kommerziellen Software erkennbar, deren Ursache v. a. im noch nicht kompletten Umfang der Modellierung des Wasserhaushalts liegt. Andere Ergebnisse, wie die gezeigte Reaktandenverteilung, stimmen dagegen schon jetzt sehr gut überein. Damit bildet der aktuelle Entwicklungsstand eine gute Basis für eine kontinuierliche Weiterentwicklung des quelloffenen Modells.

// Open-source full-cell CFD simulation model for PEM fuel cells

The development of high-performance polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells requires the behaviour of the cells to be predicted as accurately as possible. One suitable tool for this is full-cell CFD (computational fluid dynamics) modelling. These models take into account not only the usual fluid mechanics but also electrochemical reactions, current conduction and heat generation and dissipation. ZSW employs these models successfully as part of commercial software packages.

However, these commercial software solutions have the drawback that an implementation of the latest scientific findings by the user is only possible to a limited extent. On the other hand, open-source models offer precisely this option. In terms of predictive accuracy, however, they have so far not been able to keep up with their commercial counterparts.

For this reason, ZSW is expanding on one of the existing models to create an open-source full-cell model that is as general as possible, building on the already proven free CFD package OpenFOAM®. The efforts undertaken as part of the AutoStack-Industrie project (funded by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure) have already produced some promising results. The illustration below conveys an impression of this on the basis of a channel geometry suitable for fuel cells used in automobiles. Differences to commercial software are only visible in the resulting current density distribution, which is mainly due to the fact that the water balance modelling is not yet complete. Other results such as the depicted reactant distribution are already very consistent. The current state of development thus forms a solid foundation for the continuous further development of the open-source model.

// Generisches PEM-Brennstoffzellen-Designkonzept

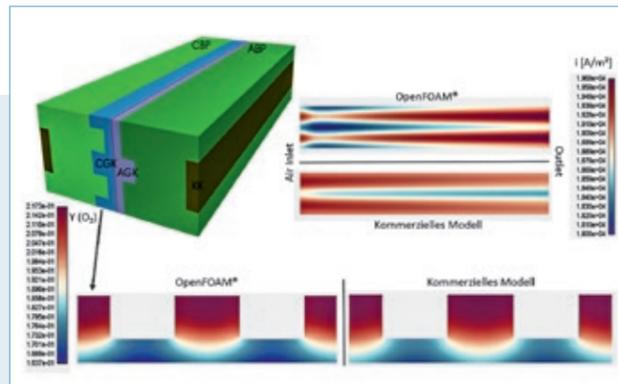
Ziel dieses Projektes ist es, einen generischen Brennstoffzellen-Stack zu entwickeln, der als vorwettbewerbliche Testplattform Untersuchungen zum mobilen Einsatz von Brennstoffzellen ermöglicht und Unternehmen für eigene Produktentwicklungen, z. B. für Komponenten und Subsysteme, zur Verfügung stehen soll. Mittlerweile wurde ein Brennstoffzellen-Stackkonzept mit einer metallischen Bipolarplatte entwickelt, das als standardisierte Messplattform verwendet werden kann. Die Größe und Auslegung des Brennstoffzellen-Stackkonzepts entspricht dabei hinsichtlich der Leistungsdichte und Maximalleistung den heute im Einsatz befindlichen automotiven Stacks. Das Stackmodul ist so konzipiert, dass sinnvolle Tests sowohl im Kurz- als auch im Langstackformat möglich sind.

Nach einer Recherche zu verfügbaren/bekanntem Designs wurde ein neues Brennstoffzellendesign entwickelt, das eine bestmögliche Schnittmenge abdeckt, ohne in Konflikt mit bereits geschützten Designs zu kommen. Weiterhin wurde eine Marktübersicht über kommerziell verfügbare Stacks erstellt sowie die Realisierbarkeit mit verfügbaren Fertigungsverfahren geprüft und im Design berücksichtigt. Das entwickelte Stackkonzept ist für eine Leistung von bis zu 150 kW geeignet und umfasst die mittels CFD-Simulationen geprüfte Portkanaldimensionierung, die Kanal-Stegegeometrie sowie ein Distributor- und Dichtungskonzept für die Bipolarplatte. Weiterhin sind die Nicht-Wiederholeinheiten im Konzept enthalten. In der Abbildung unten sind exemplarisch die Strömungsverteilung sowie der Druckabfall über das Verteilerfeld und in der Abbildung oben das resultierende Bipolarplatten- und Stackdesign wiedergegeben. Ein Folgeprojekt für weitere Details über Komponenten und Werkzeugherstellung ist beabsichtigt. Das Projekt wurde durch die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e. V. aus Eigenmitteln finanziell gefördert.

// Generic PEM fuel cell design concept

The aim of this project is to develop a generic fuel cell stack that can be used as a pre-competitive test platform for research into the mobile application of fuel cells and then made available to companies for their own product developments, e.g. components and subsystems. A fuel cell stack concept with a metallic bipolar plate has now been developed that can be used as a standardised measurement platform. Dimensioning and configuration of the fuel cell stack concept corresponds to the automotive stacks in use today in terms of power density and maximum power. The stack module is designed in such a way that meaningful tests are feasible in both short- and long-stack formats.

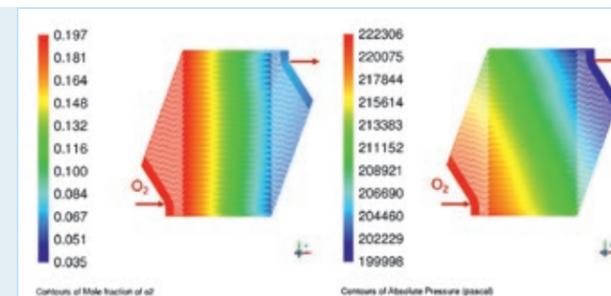
Following a search of available/known designs, a new fuel cell design was developed that covers the best possible intersection without infringing on already protected designs. Furthermore, a market overview of commercially available stacks has been compiled. Feasibility with available manufacturing processes was checked and taken into account in the design. The stack concept developed is capable of up to 150 kW of power and includes port channel dimensioning tested by means of CFD simulations, channel rib geometry as well as a distributor and sealing concept for the bipolar plate. The non-repeated units are included in the concept as well. As an example, the figure below shows the flow distribution as well as pressure drop across the distribution field and the figure above shows the resulting bipolar plate and stack design. A follow-up project for further details on components and tooling is being planned. The project was financially supported by the Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V. with private funds.



// Vollzell-CFD-Simulationen mit OpenFOAM /ZSW-Modell und kommerzieller Software. O. l.: Geometrie des Kanalausschnitts (A/CGK: Anoden/Cathoden-Gaskanal; A/CBP: Anoden/Cathoden-Bipolarplatte; KK: Kühlkanal), o. r.: Stromdichte in der Membran entlang der Kanäle, u.: Massenanteil Sauerstoff im Querschnitt im Kathoden-Auslassbereich.

// Full-cell CFD simulations with the OpenFOAM/ZSW model and commercial software. Top left: geometry of the channel section (A/CGK: anode/cathode gas channel; A/CBP: bipolar anode/cathode plate; KK: cooling channel). Top right: current density in the membrane along the channels, below: mass fraction of oxygen in the cross-section in the cathode outlet region.

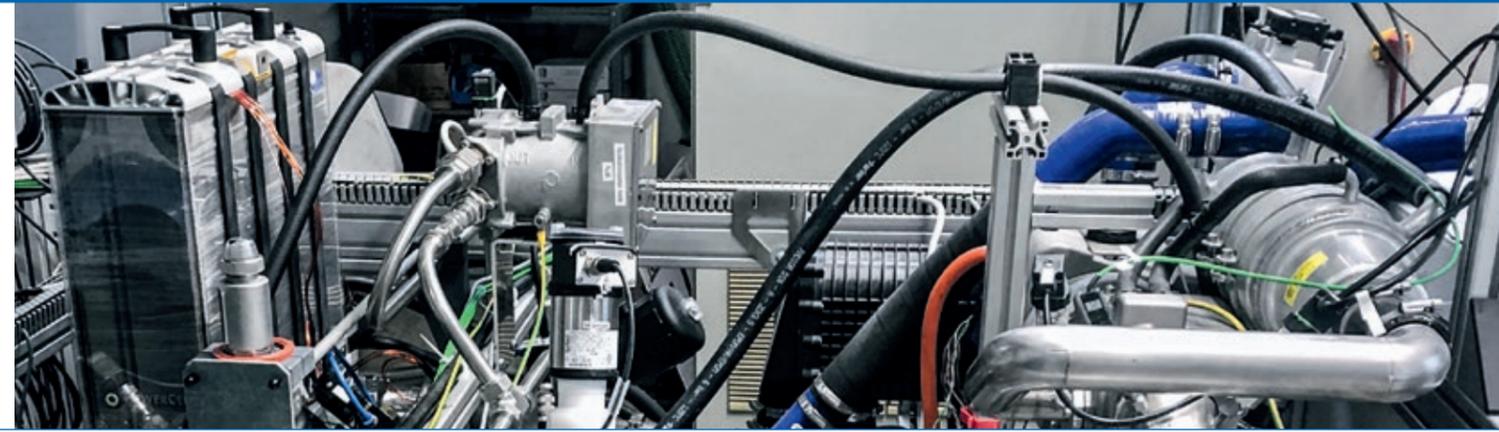
// Dr. Florian Wilhelm
E-mail: florian.wilhelm@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-203



// CFD-Simulation a) der O₂-Konzentrationsverteilung im Verteilerfeld b) der Druckverteilung im Verteilerfeld im Auslegungspunkt im H₂/Luft-Betrieb.
// CFD simulation of a) the O₂ concentration distribution in the distribution field b) the pressure distribution in the distribution field at the design point in H₂/air operating mode.

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

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



// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECS betreibt seit mehr als 20 Jahren ein Brennstoffzellen-Testzentrum mit über 30 vollautomatisierten Testständen von 0,1 bis 160 Kilowatt zur professionellen Rund-um-die-Uhr-Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stacks, -Systemen und -Systemkomponenten. Im Zentrum stehen Tests zu Lebensdauer, Gesamtwirkungsgrad und Robustheit. Ein großes Thema hierbei sind Dauertests an Brennstoffzellen-Stacks, die mittels umfangreicher Analytik sowie komplexer Methoden zur Fehleranalyse ausgewertet werden können. Das Testdatenarchiv umfasst mittlerweile über 360.000 Betriebsstunden.

In die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen und Systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen und Fahrzeugsysteme fließen viele Jahre Forschungsarbeit des ZSW ein. Das Leistungsspektrum umfasst komplette Prototypen einschließlich der Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Daneben werden meist in Industrieprojekten Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien und Produktzertifizierungen durchgeführt. Mit öffentlich geförderten Projekten werden Erkenntnisse generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

ECS untersucht außerdem Wasserstoff für seinen Einsatz als Kraftstoff im Verkehr. Das Fachgebiet mit seinem tiefen Verständnis der Brennstoffzellentechnik und damit der Nutzung von Wasserstoff ist durch mehrere Projekte in den Aufbau der europäischen Wasserstoffinfrastruktur eingebunden. Hierbei geht es um die Einhaltung internationaler Betankungsprotokolle für Wasserstofftankstellen (SAE J2601/CEP) bezüglich der Abnahme nach DIN EN 17127 sowie um die Einhaltung der für den Brennstoffzellenbetrieb notwendigen Wasserstoffqualität gemäß DIN EN 17124.

// Our main focus

For over 20 years, the ECS research department has been operating a fuel cell test centre with over 30 fully automated test rigs from 0.1 to 160 kilowatts for professional round-the-clock characterisation of fuel cell stacks, systems and system components. The focus is on testing service life, overall efficiency and robustness. Endurance tests on fuel cell stacks provide particularly valuable information which we evaluate by means of extensive analytics as well as complex methods for fault analysis. The test data archive now includes over 360,000 operating hours.

Many years of research work at ZSW have gone into developing fuel cell systems and system components for stationary systems, on-board and emergency power supplies and vehicle systems. The scope of services encompasses complete prototypes, including their control and hybridisation with batteries and DC/AC converters. For the most part, safety assessments, packaging studies and product certifications are carried out as part of industry projects. Publicly funded projects lead to findings that are available to the general public.

ECS also explores hydrogen with a view to its use as a transportation fuel. The research department, with its deep understanding of fuel cell technology and thus the utilisation of hydrogen, is involved in the development of the European hydrogen infrastructure through several projects. These involve compliance with international quality standards for hydrogen fuelling stations (SAE J2601/CEP) with regard to their acceptance pursuant to DIN EN 17127 and ensuring compliance with the hydrogen quality required for fuel cell operation pursuant to DIN EN 17124.

// Brennstoffzellen industrialisieren

Die EU-Verordnung 2019/1242 vom Juni 2019 hat 2020 der Industrialisierung der Brennstoffzelle einen starken Antrieb verschafft. Nach den gesetzlichen Vorgaben müssen die CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge (Nfz) um 15% im Jahr 2025 und um 30% im Jahr 2030 sinken. Die wesentlichen Herausforderungen von Brennstoffzellensystemen für Lkws liegen bei der geforderten Fahrleistung (Lebensdauer) und dem Gesamtwirkungsgrad. Beide Punkte können im Testzentrum am ZSW in Ulm perfekt abgebildet werden. Diese Trendwende führte auch 2020 wieder zu einem Rekordjahr im Brennstoffzellen-Testfeld: Die Anzahl von Stapel-Tests erreichte über 100.000 Stunden. Dabei stieg der Wasserstoffumsatz auf über 317.000 Kubikmeter, dies entspricht knapp 27 Tonnen. Das ZSW verfügt damit über eines der größten Brennstoffzellen Testfelder in Europa. Um dem Marktgeschehen gerecht zu werden, wurde das Testzentrum um sieben neue Teststände ausgebaut. Daneben stieg auch die Zahl der Schulungen zum Thema Kraftstoff Wasserstoff und Brennstoffzellen für Industriekunden.

Aktuell sind Untersuchungen zur Qualität der Edukte des Wasserstoffs und der Luft zur Kommerzialisierung von Brennstoffzellen für die Mobilität ein hochaktuelles Forschungsthema. Die Herausforderung liegt darin, „grünen“ Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen zu bezahlbaren Kosten und in der benötigten Qualität bereitzustellen. Mit dem Thema H₂ als Kraftstoff beschäftigt sich das Fachgebiet ECS im von der Europäischen Union geförderten Projekt HYDRAITE sowie im Verbundvorhaben H₂-Fuel im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms (NIP II). Seit der Inbetriebnahme des Wasserstoff-Qualitätslabors „HyLaB“ im Jahr 2018 steigt die Nachfrage nach Vollanalysen gemäß DIN EN 17124. Außerdem erfolgen kontinuierlich Abnahmen von nationalen und internationalen H₂-Tankstellen nach internationalen Vorgaben der DIN EN 17127.

// Industrialising fuel cells

EU Regulation 2019/1242 from June 2019 has spurred the industrialisation of fuel cells in 2020. According to the legal requirements, CO₂ emissions from heavy-goods vehicles (HGVs) must decrease by 15% in 2025 and by 30% in 2030. The main challenges faced by fuel cell systems for HGVs lie in service life and overall efficiency. Both points can be perfectly modelled in the test centre at ZSW in Ulm. This turnaround led to another record year for fuel cell testing in 2020: the number of stack tests reached over 100,000 hours. During this time the hydrogen consumption rose to over 317,000 cubic metres, which equates to just under 27 tonnes. This means that ZSW has one of the largest fuel cell test fields in Europe. The test centre was expanded by seven new test rigs in order to keep up with the market. At the same time, the number of training courses on hydrogen fuel and fuel cells for industrial customers increased.

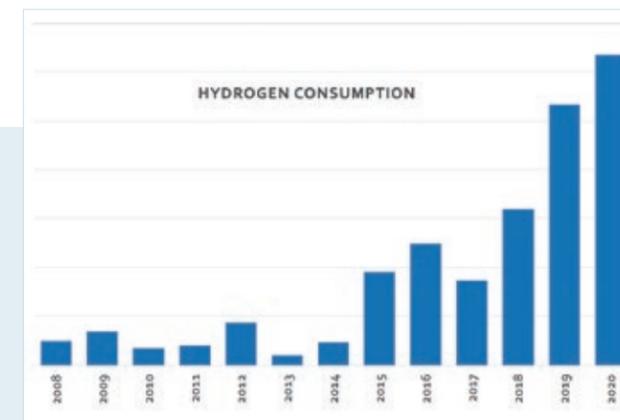
Research on the quality of the reactants of hydrogen and air for the commercialisation of fuel cells for mobility is highly topical. The challenge lies in providing “green” hydrogen from renewable sources at affordable costs and quality. The ECS department is dealing with the topic of H₂ as a fuel as part of the HYDRAITE project funded by the European Union and in the joint H₂-Fuel project within the framework of the National Innovation Programme (NIP II). Since the commissioning of the hydrogen quality laboratory “HyLaB” in 2018, there has been an increase in demand for full analyses in accordance with DIN EN 17124. Furthermore, ZSW continually conducts acceptances of national and international H₂ refuelling stations in accordance with the international specifications of DIN EN 17127.



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

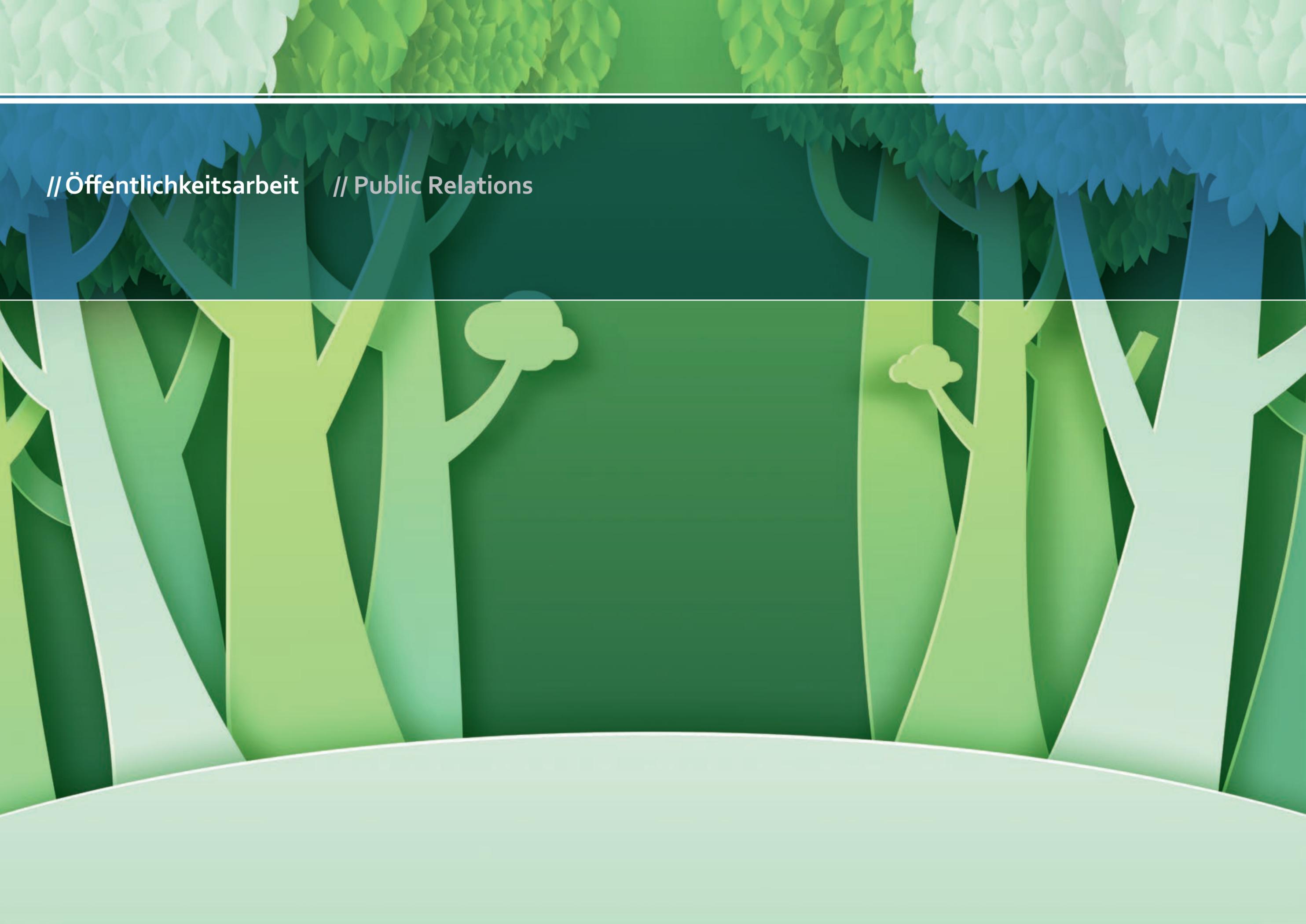
// Dr. Alexander Kabza, Head of Department
E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-832

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



// Rekordjahr im Brennstoffzellen-Testzentrum:
Für 100.000 Brennstoffzellen-Teststunden wurden 2020 am ZSW 317.000 m³ Wasserstoff umgesetzt.
// Record year at the fuel cell test centre:
for 100,000 fuel cell test hours, 317,000 m³ of hydrogen were converted at ZSW in 2020.

// Dr. Alexander Kabza
E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-832



// Öffentlichkeitsarbeit // Public Relations

// Öffentlichkeitsarbeit

// Public relations

Unsere Themen sind ebenso spannend wie komplex. Darum informieren wir Wirtschaft, Politik und Gesellschaft nachvollziehbar und neutral über neue Technologien für die Energiewende. Denn nur wer Innovationen versteht, kann sie bewerten und ihre Umsetzung in die Praxis unterstützen – und so dazu beitragen, eine klimaneutrale Energieversorgung zu gestalten. Mit dem folgenden Rückblick vermitteln wir Ihnen einen Eindruck von unseren Veranstaltungen und unserer Medienarbeit 2020.

Our topics are as exciting as they are complicated. This is why we explain the new technologies needed for the energy transition to businesses, politics and the larger society in a graspable and objective way. After all, only those who understand these innovations can evaluate them and support their practical application and thus help to shape a climate-neutral energy supply. The following review will offer an impression of our events and our media work in 2020.

// STAATSEKRETÄR BILGER VERKÜNDET HyFaB-FÖRDERUNG

Am 23. Juni besuchte Steffen Bilger, Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesverkehrsministerium (BMVI) und Koordinator der Bundesregierung für Güterverkehr und Logistik, das ZSW in Ulm. Die Delegation führte die Ulmer Bundestagsabgeordnete Ronja Kemmer (Wahlkreis 291 Ulm/Alb-Donau), begleitet von Ulms Oberbürgermeister Gunter Czisch. Anlass des Treffens war es, das Projekt „HyFaB – Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff“ zu konkretisieren. Es soll die Zulieferindustrie stärken, automatisierte Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren für Brennstoffzellen entwickeln sowie Fabrikabnahmetests und großserientaugliche InbetriebnahmeprozEDUREN etablieren.

Der Bund unterstütze die Ziele von HyFaB uneingeschränkt und sehe große Chancen für die deutsche Industrie, so Bilger. Man habe vor allem wichtige Branchen wie den Maschinenbau und die Automobilzulieferer im Blick. Ulm soll mit dem Projekt seine Bedeutung als bedeutender nationaler Standort in der Brennstoffzellenforschung ausbauen. Das BMVI beabsichtigt, die Produktions- und Prozessforschung über öffentliche Projekte mit der Industrie über die kommenden Jahre mit 30 Millionen Euro zu fördern. Das Land Baden-Württemberg fördert bereits erste Forschungsarbeiten zu HyFaB sowie einen Neubau für die Infrastruktur am ZSW in Ulm bis 2021 mit 18,4 Millionen Euro.

// STATE SECRETARY BILGER ANNOUNCES HyFaB FUNDING

On 23 June Steffen Bilger, Parliamentary State Secretary at the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) and Federal Government Coordinator for Freight Transport and Logistics, visited the ZSW in Ulm. Ulm's Bundestag Member Ronja Kemmer (constituency 291 Ulm/Alb-Donau) led the delegation, accompanied by Ulm's Lord Mayor Gunter Czisch. The reason for the meeting was to substantiate the "HyFaB - Research Factory for Fuel Cells and Hydrogen" project. Its goal is to strengthen the supplier industry, develop automated production and quality assurance procedures for fuel cells and establish factory acceptance tests and commissioning procedures suitable for large-scale production.

Bilger said that the federal government fully supports the goals of HyFaB and sees great opportunities for the German industry. Above all, important sectors such as mechanical engineering and automotive suppliers are involved. This project consolidates the significance of Science City Ulm as an important national location for fuel cell research. The Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure intends to fund production and process research through public projects together with industry with 30 million euros over the next few years. The Federal State of Baden-Württemberg is already providing funding of 18.4 million euros for initial research work on HyFaB as well as a new building for the infrastructure at ZSW in Ulm 2021.



// Bundesverkehrsministerium will HyFaB-Projekte mit 30 Millionen Euro fördern (v. li.): Ulmer OB Czisch, Parl. Staatssekretär Bilger, Bundestagsabgeordnete Kemmer, ZSW-Vorstand Staiß und Leiter der Brennstoffzellenforschung Jörisen.

// German Federal Ministry of Transport intends to fund HyFaB projects with 30 million euros (from left): Ulm Mayor Czisch, Parliamentary State Secretary Bilger, Member of the Bundestag Kemmer, ZSW Board Member Staiß and Head of Fuel Cell Research Jörisen.



// Die Projektpartner der BIPV-Initiative am ZSW (von li.): Markus Müller (Präsident der Architektenkammer BW), Prof. Dr. Andreas Bett (Institutsleiter Fraunhofer ISE), Umweltminister Franz Untersteller MdL, Prof. Dr. Michael Powalla (ZSW-Vorstand) und Prof. Dr. Thomas Stark, Hochschule Konstanz für Technik, Wirtschaft und Gestaltung (HTWG).

// The project partners of the BIPV initiative at ZSW (from left to right): Markus Müller (President of the Chamber of Architects BW), Prof. Dr. Andreas Bett (Director of the Fraunhofer Institute ISE), Minister of the Environment Franz Untersteller (Member of the Baden-Württemberg State Parliament), Prof. Dr. Michael Powalla (ZSW Board of Directors) and Prof. Dr. Thomas Stark, Hochschule Konstanz für Technik, Wirtschaft und Gestaltung (HTWG).

// UMWELTMINISTERIUM FÖRdert SOLARAKTIVE GEBÄUDE FÜR DEN KLIMASCHUTZ

Auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand bietet die Photovoltaik ein enormes Potenzial für zusätzliche nachhaltige Stromerzeugung. Mit rund 1,5 Millionen Euro fördert das Umweltministerium Baden-Württemberg deshalb ein Forschungsprojekt zu bauwerksintegrierten Photovoltaik-Anlagen, kurz: BIPV. Die Übergabe des Bewilligungsbescheides fand am 9. Juli am ZSW statt. Unter der Leitung der Architektenkammer Baden-Württemberg (AKBW) erarbeiten vier Projektpartner bis Anfang 2023 einen Leitfaden für optimale Planungs- und Bauprozesse sowie den Entwurf einer BIPV-Richtlinie als Empfehlung für die Politik. Ziel ist, den Ausbau der Solarstromerzeugung am Gebäude über integrierte Photovoltaik-Dachelemente, -Ziegel und -Fassadenbauteile zu beschleunigen.

„Die photovoltaische Solarenergie ist eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende. Bei einem Bedarf von etwa der vierfachen PV-Leistung in Baden-Württemberg bis 2050 gilt es, künftig nicht nur die Dachflächen, sondern die ganze Gebäudehülle für die Solar-nutzung zu erschließen. Angesichts der damit einhergehenden stadt-bildprägenden Wirkung sehen wir uns darüber hinaus gefordert, diese PV-Anlagen nunmehr als eigenständiges Element der Bau-kultur weiterzuentwickeln“, sagte Umweltminister Franz Untersteller MdL. „Das interdisziplinäre Forschungsprojekt zur gebäudeintegrierten PV ist wegweisend, weil es prozessual und projekthaft denkt. Die gewonnenen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen werden für Architekten, Bauherren, Hersteller und auch die politischen Entscheider von Nutzen sein.“

// MINISTRY OF THE ENVIRONMENT FUNDS SOLAR ACTIVE BUILDINGS FOR CLIMATE PROTECTION

As we move towards a climate-neutral building stock, photovoltaics offer a huge potential for additional sustainable electricity generation. For this reason, the Baden-Württemberg Ministry of the Environment is funding a research project on building-integrated photovoltaic systems, BIPV for short, with around 1.5 million euros. The award decision was presented at ZSW on 9 July. Under the leadership of the Chamber of Architects Baden-Württemberg (AKBW), four project partners are developing a guideline for optimal planning and construction processes by the beginning of 2023 as well as a draft for a BIPV guideline to serve as a recommendation for policymakers. The aim is to accelerate the expansion of building-mounted solar power generation via integrated photovoltaic roof elements, tiles and façade components.

“Photovoltaic solar energy is a key technology for the energy transition. With a demand of about four times the PV output in Baden-Württemberg by 2050, it will be crucial to utilise not only roof surfaces but also the entire building envelope for solar energy in the future. In view of the effect this has on the cityscape, we also believe it is our duty to further develop these PV systems as an independent element of building culture,” said Franz Untersteller, the Minister of the Environment and Member of the Baden-Württemberg State Parliament. “The interdisciplinary research project on building-integrated PV is a pioneering one because it functions in terms of processes and projects. The findings obtained in the project and recommendations for action derived from them will benefit architects, builders, manufacturers and also policy-makers.”



// Umweltminister Franz Untersteller (re.) übergibt ZSW-Vorstand Prof. Dr. Michael Powalla den Förderbescheid über 1,5 Mio. Euro.

// Minister of the Environment Franz Untersteller (right) presents ZSW board member Prof. Dr. Michael Powalla with the funding approval for 1.5 million euros.



// Ministerin Hoffmeister-Kraut MdL übergibt dem ZSW zwei Förderbescheide für die Projekte HyFaB und RecycleMat in Höhe von rund 11,4 Mio. Euro.
// Minister Hoffmeister-Kraut presents ZSW with two funding approvals for the HyFaB and RecycleMat projects amounting to around 11.4 million euros.



// MINISTERIN HOFFMEISTER-KRAUT ÜBERGIBT FÖRDERBESCHIED FÜR HyFaB UND RecycleMAT

Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut MdL besuchte im Rahmen ihrer Sommertour zum Thema „Umweltschutz, CO₂-neutrale Produktion und Recycling: Baden-Württembergs Wirtschaft auf dem Weg zur nachhaltigen Produktion“ das ZSW. Hierbei übergab sie zwei Förderbescheide: 10,5 Millionen Euro für den Bau der Brennstoffzellen-Forschungsfabrik HyFaB, die in Ulm bis 2021 entstehen soll. In HyFaB werden Produktionsprozesse für eine industrielle Brennstoffzellenfertigung in einer offenen, flexiblen Plattform erforscht. Einen weiteren Förderbescheid in Höhe von 870.000 Euro gab es für das Forschungsprojekt RecycleMat, in dem das ZSW erforscht, wie sich Rohstoffe aus Batterien recyceln lassen. Im Fokus steht die Wiederaufbereitung von Kobalt, Lithium und Naturgraphit. „Hochwertiges Recycling ist eine Schlüsselkompetenz für den Industriestandort Baden-Württemberg. Batterien bieten neben den enormen wirtschaftlichen Chancen auch die Möglichkeit, nachhaltiger zu wirtschaften, und können zu einem wirkungsvollen Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels werden“, so die Ministerin.

// „ELEKTROLYSE MADE IN BADEN-WÜRTTEMBERG“ – INDUSTRIEDIALOG GESTARTET

Am 14. Juli fand die Auftaktveranstaltung zum Industriedialog im Rahmen des Projektes „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“ mit über 130 TeilnehmerInnen online statt. Das Projekt „BW-Elektrolyse“ soll die Industrialisierung der Elektrolyse-Technologie zur Herstellung von grünem Wasserstoff vorantreiben. Der begleitende Industriedialog hat zum Ziel, die Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit baden-württembergischer Unternehmen im Bereich Elektrolyse zu stärken. Hierzu werden Informationsveranstaltungen und Themenworkshops durchgeführt, bei denen auch die Planung, der Bau und der Betrieb der Elektrolyse „made in Baden-Württemberg“ unmittelbar an einem Technologie-Demonstrator am ZSW begutachtet werden können. Gefördert wird das Verbundprojekt vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg.

// MINISTER HOFFMEISTER-KRAUT PRESENTS FUNDING APPROVALS FOR HyFaB AND RecycleMAT

Baden-Württemberg's Minister for Economic Affairs, Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut, Member of the Baden-Württemberg State Parliament, visited ZSW as part of her summer tour on the topic of "Environmental protection, CO₂-neutral production and recycling: Baden-Württemberg's economy en route to sustainable production". She presented two funding approvals: 10.5 million euros for the construction of the HyFaB fuel cell research factory, which will be built in Ulm by 2021. Production processes for industrial fuel cell manufacturing will be researched in an open, flexible platform in HyFaB. Another funding approval of 870,000 euros was granted for the RecycleMat research project in which ZSW is researching how raw materials from batteries could be recycled. The focus is on recycling cobalt, lithium and natural graphite. "High-quality recycling is a key competence of Baden-Württemberg as an industrial location. In addition to tremendous economic opportunities, batteries are an enabling technology towards sustainability and may become an effective tool in the fight against climate change," she said.

// "ELECTROLYSIS MADE IN BADEN-WÜRTTEMBERG" – INDUSTRIAL DIALOGUE LAUNCHED

A kick-off event for the industrial dialogue within the framework of the "Electrolysis made in Baden-Württemberg" project took place online on 14 July with more than 130 participants. The project "BW Electrolysis" seeks to advance the industrialisation of electrolysis technology for the production of green hydrogen. The accompanying industrial dialogue has the goal of improving the future viability and competitiveness of Baden-Württemberg-based companies in the field of electrolysis. To this end, information events and themed workshops will be held at which the planning, construction and operation of electrolysis technology "made in Baden-Württemberg" may be directly observed on a technology demonstrator at ZSW. The joint project is funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs.



// Eine Delegation um Dr. Stefan Kaufmann MdB (re.) informiert sich über die Innovationskraft zu Brennstoffzellen in der Ulmer Wissenschaftsstadt.
// A delegation led by Dr. Stefan Kaufmann (Member of the German Bundestag; right) is briefed on the innovation potential of fuel cells in Ulm, the City of Science.

// BUNDESTAGSABGEORDNETER DR. STEFAN KAUFMANN BESICHTIGT ZSW-BRENNSTOFFZELLENFORSCHUNG

Als Innovationsbeauftragter „Grüner Wasserstoff“ beim Bundesforschungsministerium soll Dr. Stefan Kaufmann die Umsetzung der Wasserstoffstrategie vorantreiben. Die Delegation führte Ronja Kemmer (MdB) am 2. September ans ZSW, wo sie von den Vorständen Prof. Dr. Frithjof Staiß und Prof. Dr. Markus Hölzle und dem Leiter Brennstoffzellenforschung Dr. Ludwig Jörissen empfangen wurde. Themen waren das Innovationspotenzial der Wissenschaftsstadt Ulm und inwieweit wissenschaftliche Erkenntnisse und Technologien in marktfähige Produkte umgesetzt und kommerzialisiert werden können. Von der Universität Ulm führten Präsident Prof. Dr. Michael Weber und der Leiter des Instituts für Energiewandlung und -speicherung Prof. Dr.-Ing. Josef Kallo die Diskussionen. Die Industrie vertrat Karl-Heinz Raguse vom Bundesverband für mittelständische Wirtschaft, Kreisverband Ulm. Anwesend war auch das Vorstandsmitglied der CDU Nord-Württemberg Eduard Freiheit von der MIT-Bundeskommission Umwelt und Energie.

// MEMBER OF THE GERMAN BUNDESTAG DR. STEFAN KAUFMANN VISITS ZSW FUEL CELL RESEARCH

As Innovation Officer for Green Hydrogen at the German Federal Ministry of Education and Research, Dr. Stefan Kaufmann is responsible for driving forward the implementation of the Hydrogen Strategy. The delegation led Ronja Kemmer (Member of the German Bundestag) to ZSW on 2 September, where she was received by the board members Prof. Dr. Frithjof Staiß and Prof. Dr. Markus Hölzle and the head of fuel cell research Dr. Ludwig Jörissen. Topics included the innovation potential of Ulm as a City of Science and the extent to which scientific findings and technologies might be translated into marketable products and then commercialised. President Prof. Dr. Michael Weber and the Head of the Institute for Energy Conversion and Storage Prof. Dr.-Ing. Josef Kallo from Ulm University led the discussions. Representing the industry was Karl-Heinz Raguse from Bundesverband für mittelständische Wirtschaft e.V., Kreisverband Ulm. Eduard Freiheit, board member of CDU North-Württemberg, from "MIT-Bundeskommission Umwelt und Energie", was also present.

// VERKEHRSMINISTER WINFRIED HERMANN BESUCHT DAS ZSW IN STUTTGART

Auf seiner Sommerreise 2020 besuchte Minister Winfried Hermann MdL am 2. September das ZSW in Stuttgart. Thema waren aktuelle Forschungsaktivitäten zu Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen. Der Verkehrsminister wurde begleitet von Peter Pätzold, Baubürgermeister der Landeshauptstadt Stuttgart, Daniel Renkonen MdL, dem verkehrspolitischen Sprecher der Grünen, sowie von Vertretern des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg. Nach Impulsvorträgen und Diskussionen besichtigte die Delegation Labore am ZSW. Hierbei standen aktuelle Forschungsprojekte zur effizienten und kostengünstigen Herstellung von regenerativem Wasserstoff, zur Bereitstellung von CO₂ aus der Luft sowie zur Synthese von synthetischen Kraftstoffen aus grünem Wasserstoff für eine klimaneutrale Mobilität im Mittelpunkt.

// MINISTER OF TRANSPORT WINFRIED HERMANN VISITS ZSW IN STUTTGART

Minister Winfried Hermann, Member of the Baden-Württemberg State Parliament visited ZSW in Stuttgart on 2 September during his 2020 summer trip. The topics were current research activities on hydrogen and synthetic fuels. The Minister of Transport was accompanied by Peter Pätzold, Mayor of the State Capital Stuttgart, Daniel Renkonen, Member of the State Parliament, the transport policy spokesman of the Green Party and representatives of the Baden-Württemberg Ministry of Transport. Following keynote speeches and discussions, the delegation visited laboratories at ZSW. The focus was on current research projects for efficient and cost-effective production of regenerative hydrogen, CO₂ extraction from the air and the production of synthetic fuels from green hydrogen for climate-neutral mobility.



// Maike Schmidt, Andreas Brinner und Dr. Marc-Simon Löffler moderieren die digitale Auftaktveranstaltung zum Industriedialog im Rahmen des Projektes „Elektrolyse made in Baden-Württemberg“.
// Maike Schmidt, Andreas Brinner und Dr. Marc-Simon Löffler host the digital kick-off event for industrial dialogue as part of the "Electrolysis made in Baden-Württemberg" project.



// Minister Hermann MdL informiert sich am ZSW in Stuttgart über aktuelle Forschungsprojekte zu Wasserstoff und regenerativen Kraftstoffen.
// Minister Hermann, Member of the Baden-Württemberg State Parliament, learns about current research projects on hydrogen and renewable fuels at ZSW in Stuttgart.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Gespräch am ZSW mit Matthias Gastel MdB über die Rolle regenerativer Kraftstoffe auf Basis von Strom im Verkehr.
// Talk at ZSW with Matthias Gastel (Member of the German Bundestag) about the role of renewable fuels based on electricity in transport.



// Ausschnitte der Imagefilme zu den Themen Photovoltaik, Simulation und Optimierung sowie Regenerative Energieträger.
// Clips of the promotional films on the topics of photovoltaics, simulation and optimisation and regenerative energy sources.



// GESPRÄCH MIT MATTHIAS GASTEL MDB ZU WASSERSTOFF UND E-FUELS AM ZSW

Am 21. Oktober suchte der Bundestagsabgeordnete Matthias Gastel das Gespräch mit dem ZSW. Im Fokus des Treffens standen Fragen um zukünftige Antriebe für Fahrzeuge, die sich weder mit Akku noch über Oberleitung mit elektrischer Energie versorgen lassen. Eine Alternative sind regenerative Kraftstoffe, die auf Basis von Strom erzeugt werden – sog. eFuels und Wasserstoff. Gemeinsam mit seinem Team ließ sich der Bundestagsabgeordnete den aktuellen Forschungsstand durch Maike Schmidt, Leiterin des Fachgebiets Systemanalyse, in Stuttgart erläutern.

// TALK WITH MATTHIAS GASTEL (MEMBER OF THE GERMAN BUNDESTAG) ON HYDROGEN AND E-FUELS AT ZSW

On 21 October, Matthias Gastel, Member of the German Bundestag, asked to talk to ZSW. The focus of the meeting was on questions about future power supplies for vehicles that cannot be supplied with electrical energy either by battery or overhead line. One alternative would be renewable fuels produced on the basis of electricity – so-called eFuels and hydrogen. The Member of the Bundestag and his team listened to Maike Schmidt, head of the Systems Analysis department, present the current state of research in Stuttgart.

// ZSW DISKUTIERT IM VDI-TRENDFORUM 2020 ÜBER WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN

Am 22. Oktober fand das VDI-Trendforum 2020 in hybrider Veranstaltungsform am ZSW in Stuttgart statt. Diskutiert wurden die Perspektiven von Wasserstoff für die Transformation des Energiesystems in den Bereichen Mobilität, Industrie und Wärme sowie die Speicherung von Strom. Das ZSW berichtete der Expertengruppe aus Sicht der Wissenschaft über eigene Lösungsansätze und Erfahrungen von den Grundlagen bis zur industriellen Umsetzung und spannte dabei den Bogen bis zur Wasserstoffstrategie der Bundesregierung.

// ZSW DISCUSSES HYDROGEN TECHNOLOGIES AT THE VDI TREND FORUM 2020

VDI Trend Forum 2020 took place in a hybrid event format at ZSW in Stuttgart on 22 October. The perspectives of hydrogen for transforming the energy supply system in the areas of mobility, industry and heating as well as the storage of electricity were discussed. ZSW reported to the expert group from a scientific perspective on its own solutions, approaches and experiences, from basics to industrial implementation, spanning an arc to the hydrogen strategy of the German Federal Government.

// AUSSTELLUNGEN UND MESSEN 2020:

Von Mitte März 2020 an musste aufgrund der Ausnahmesituation in Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie von Präsenzveranstaltungen weitgehend abgesehen werden. Viele Konferenzen oder Messen wurden abgesagt (Hannover Messe, Intersolar), auf 2021 verlegt (z. B. die 17. UECT, ebenso wie die für Mai gemeinsam mit dem HIU und CELEST geplante Energieausstellung im Rahmen von „Berblinger 2020“ in der Ulmer Innenstadt) oder fanden virtuell statt (EU-PVSEC). Vor diesem Hintergrund musste leider auch der erstmals am ZSW geplante und bereits voll ausgebuchte Girls' Day abgesagt werden.

// EXHIBITIONS AND TRADE FAIRS 2020:

From mid-March 2020 onwards, attendance events had to be largely dispensed with due to the exceptional situation surrounding the Covid-19 pandemic. Many conferences or trade fairs had been cancelled (Hannover Messe, Intersolar), postponed to 2021 (for example, the 17th UECT as well as the energy exhibition planned for May together with HIU and CELEST as part of the 2020 Berblinger Festival in Ulm's city centre) or took place virtually (EU-PVSEC). Against this background, the Girls' Day planned for the first time at ZSW, which was already fully booked, unfortunately had to be cancelled.

// MEDIENARBEIT 2020:

Die Medienarbeit des ZSW ist weiterhin sehr erfolgreich, nicht zuletzt wegen der hochaktuellen Forschungsthemen rund um erneuerbare Energietechnologien. 2020 wurde insgesamt 3.713 Mal über das Institut berichtet – eine Steigerung von fast 11 % gegenüber 2019. Auch in diesem Jahr war das ZSW in den wichtigsten überregionalen und regionalen Leitmedien vertreten, beispielsweise Handelsblatt, Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, WirtschaftsWoche, Tagesspiegel Background Energie, Stuttgarter Zeitung oder Staatsanzeiger. Außerdem berichteten diverse Radio- und TV-Sender über das ZSW, beispielsweise die Tagesschau oder SWR aktuell.

// MEDIA RELATIONS 2020:

ZSW's media work remains successful, not least because of the highly current research topics involving renewable energy technologies. In 2020, the institute was reported on a total of 3,713 times – an increase of almost 11% compared to 2019. This year, ZSW was again featured in the most important national and regional media, including Handelsblatt, Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, WirtschaftsWoche, Tagesspiegel Background Energie, Stuttgarter Zeitung and Staatsanzeiger. In addition, various radio and TV stations reported on the ZSW, for example the Tagesschau or SWR aktuell.

Die quantitativ beste Resonanz in den Medien erzielten die ZSW-Presseinformationen „Erneuerbaren-Anteil wegen großer Sondereffekte erstmals bei 52 Prozent“ (588 Berichte in den Medien) sowie „Zahl der Elektroautos steigt weltweit von 5,6 auf 7,9 Millionen“ (567 Berichte).

ZSW's press releases "Renewable share reaches 52 percent for the first time due to extraordinary effects" (588 media reports) and "Number of electric cars worldwide increases from 5.6 to 7.9 million" (567 reports) achieved the best media response in terms of quantity.



// Ankündigung des VDI-Trendforums 2020 am ZSW.
// Announcement of the VDI Trend Forum 2020 at ZSW. (Image: VDI)

// NEU IN DER MEDIATHEK

Bewegtbild ist Trumpf – darum ist das ZSW jetzt auch mit seinen Themen Photovoltaik, Simulation und Optimierung sowie Regenerative Energieträger im Videoformat erlebbar. Die drei neuen Fachfilme sowie ein Imagefilm zum gesamten Forschungsspektrum des ZSW sind abrufbar unter:

www.zsw-bw.de/mediathek/filme.html

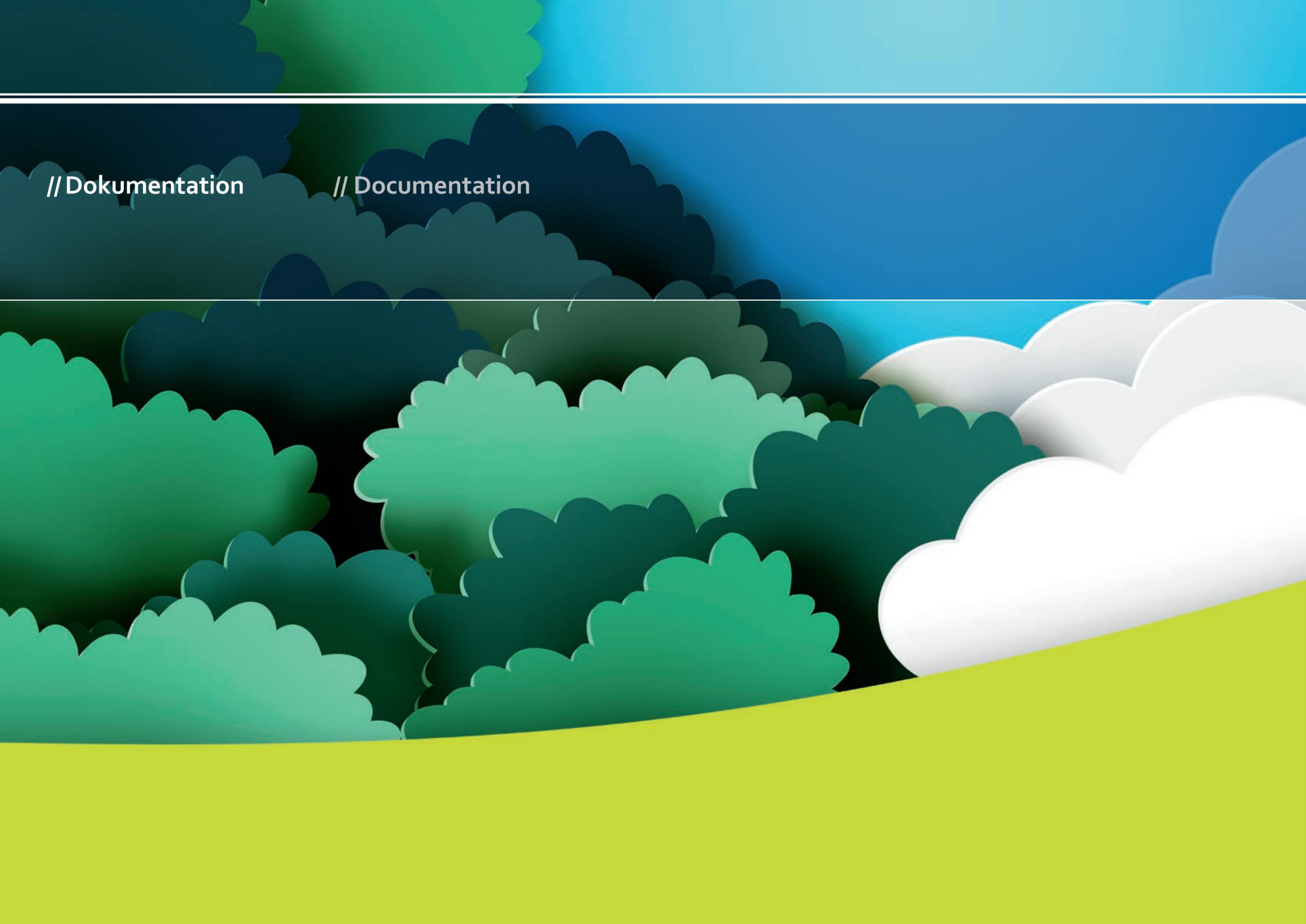
// NEW IN THE MEDIA LIBRARY

Moving pictures are key – that's why ZSW can now be experienced in video format with its topics of photovoltaics, simulation and optimisation as well as renewable energy sources. The three new technical films and a promotional film on the entire research spectrum of ZSW are available at:

www.zsw-bw.de/en/media-center/videos

// Dokumentation

// Documentation



// Finanzielle Entwicklung Financial Development



// EINNAHMEN – AUSGABEN

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 45,5 Mio. Euro und damit unter dem Niveau von 2019, weil im Vorjahr überdurchschnittlich hohe Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen im Themenfeld Photovoltaik Materialforschung zugegangen sind.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2020 um 0,4 Mio. auf 5,2 Mio. Euro.

// REVENUE – EXPENDITURE

The income volume for ordinary business activities amounted to EUR 45.5 million in the past year, lower than in the previous year due to above average investment funding for photovoltaic materials research in 2019.

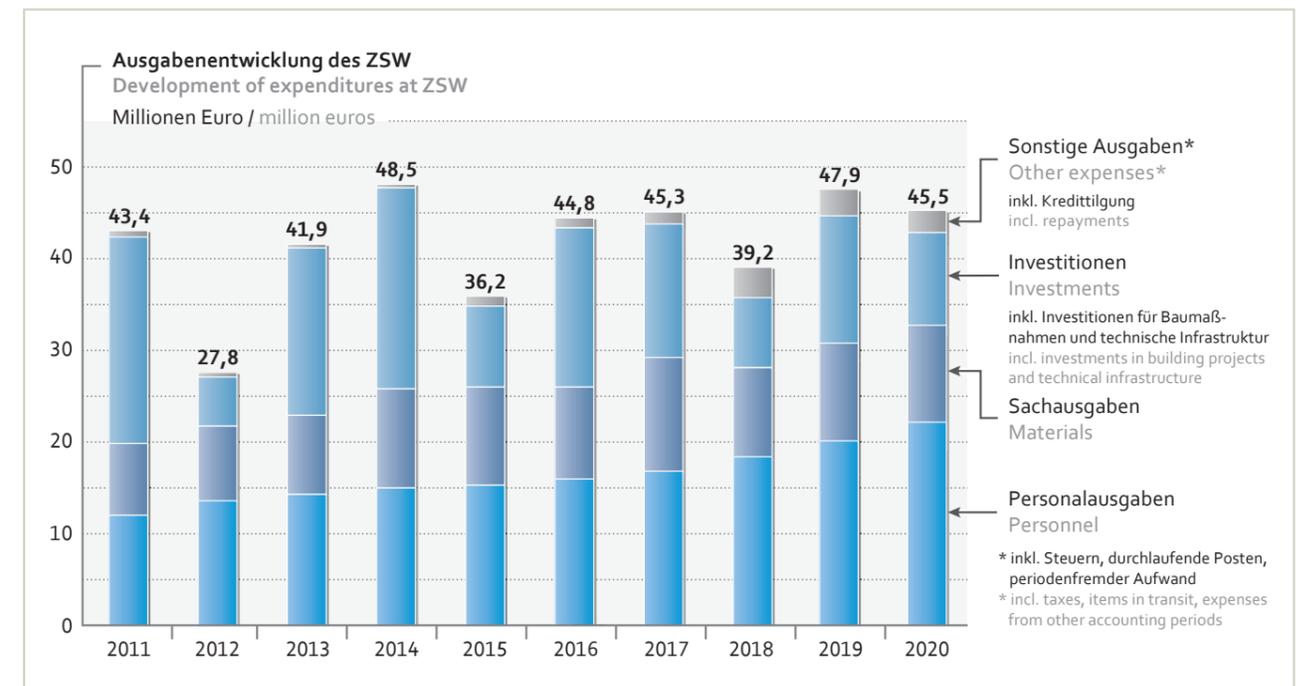
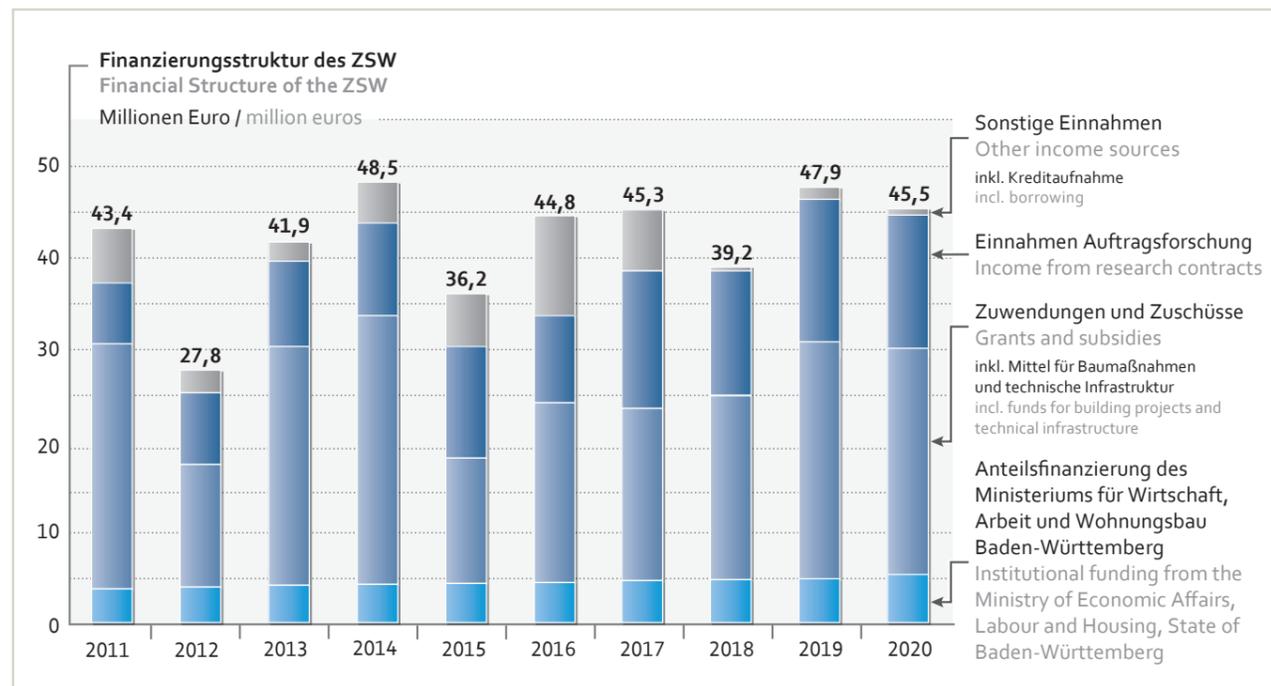
The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased by 0.4 million to EUR 5.2 million in 2020.

Das Ausgabevolumen reduzierte sich im Berichtsjahr korrespondierend zu den geringeren Investitionen auf 45,5 Mio. Euro.

Die Personalausgaben stiegen aufgrund einer Tarifierhöhung und eines Anstiegs der Personalkapazität auf 22 Mio. Euro.

The expenditure volume decreased to EUR 45.5 million in the reporting year, corresponding to the reduced investments.

Due to a collective pay increase and a rise in personnel capacity, expenditure for human resources rose to EUR 22 million.



// Personalentwicklung Staff Development



// PERSONALENTWICKLUNG

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

Die Mitarbeiterkapazität hat sich im Jahr 2020 gegenüber dem Vorjahr von 253 Vollzeitstellen auf 266 erhöht. Das entspricht einer Mitarbeiterzahl von 292. Mit einem Anteil von 85 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau.

Das ZSW ist auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland attraktiv. So hatten gut 10 % aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft, wobei diese aus zehn verschiedenen Ländern kamen.

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 unterschiedlichen Lebenssituationen und Interessen von Frauen und Männern berücksichtigen und eine Vereinbarkeit von Beruf und Familie erleichtern.

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

// STAFF DEVELOPMENT

Thanks to its forward-looking topics, its working conditions, the collegial working atmosphere and the many prospects for personal development, ZSW is an attractive employer.

Employee capacity increased from 253 to 266 full-time equivalents in 2020. This corresponds to 292 employees. With 85% of all staff active in the scientific and technical area, productivity remains at a stable high level.

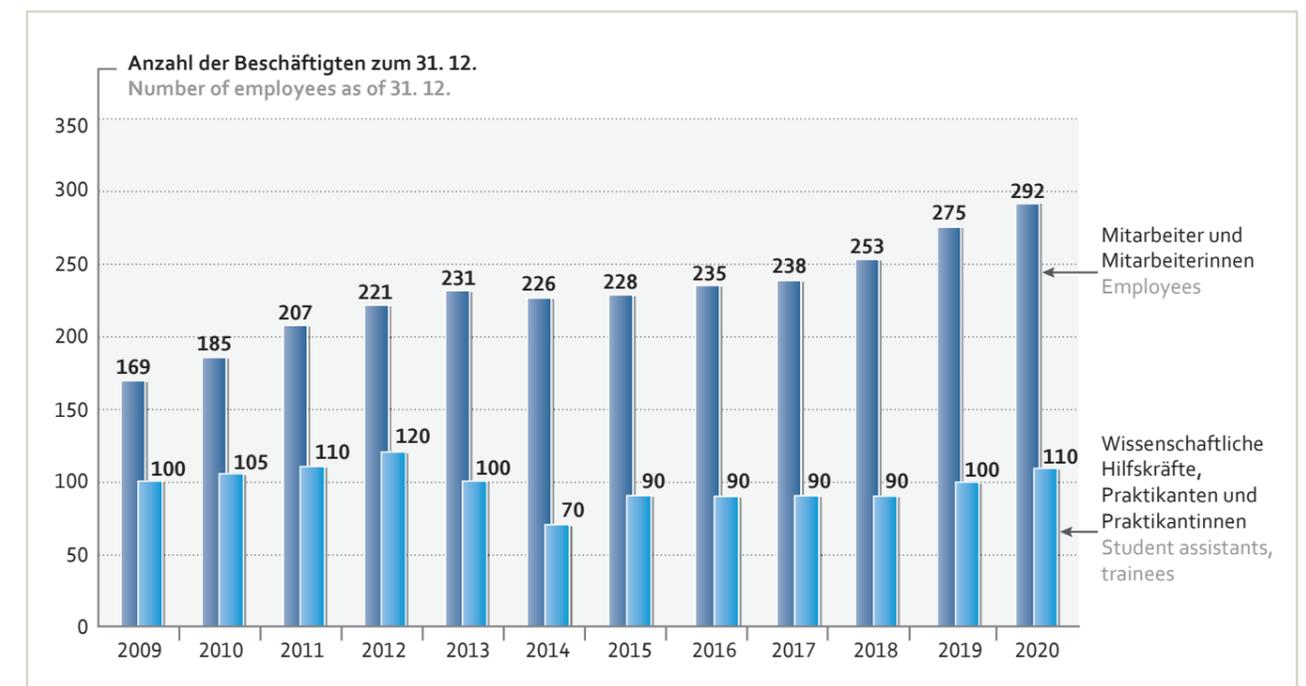
ZSW is also attractive to scientists from abroad. For example, a good 10% of all employees had a foreign nationality: they came from 10 different countries.

Women constitute 23% of the staff. ZSW strives to increase this percentage of women employees, which is typical for technically oriented research institutes, by offering working time models with maximum flexibility to facilitate a good work-life balance.

Our highly-qualified and motivated employees are ZSW's key success factor. ZSW therefore offers a broad range of training and continuing professional development with both specialist and interdisciplinary content as well as personal development and executive training. The employees are very interested in this offer: more than 20 events were held, with a total of about 100 employee participants. Moreover, in the framework of the institute's corporate health management, ZSW once again offered numerous programmes on exercise, stress prevention, nutrition and workplace ergonomics, among others. Some programs had to be reduced or modified due to the Corona pandemic.

Einen hohen Stellenwert nehmen die Vernetzung des ZSW mit Hochschulen, die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten ein. Daher waren 2020 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 110 Studierende und Praktikanten am ZSW beschäftigt. Im Berichtsjahr fertigten 30 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertation an.

The institute prioritises networking with universities and the active involvement of ZSW employees in academic education through providing lectures, seminars and practical training as well as supervising final theses and dissertations. As a result, in addition to the staff employees, ZSW also employed 110 students and interns in 2020. In the reporting year, 30 doctoral candidates completed their doctoral theses.



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications



// VERÖFFENTLICHUNGEN IN BÜCHERN UND ZEITSCHRIFTEN

PUBLICATIONS IN BOOKS AND JOURNALS

- / Aarhaug T. (SINTEF), Bacquart T. (NPL), Valter V., Optenhostert T. (ZBT); **Assessment of hydrogen quality dispensed for hydrogen refuelling stations in Europe**; International Journal of Hydrogen Energy, available online 11 Dec. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.163>
- / Armand M. (CIC EnergiGune), Axmann P., Bresser D. (KIT), Copley M. (Univ. of Warwick), Edström K. (Uppsala Univ.), Ekberg C. (Chalmers Univ. of Techn.), Guyomard D. (Univ. Nantes), Lestriez B. (Univ. Nantes), Novák P. (PSI), Petranikova M. (Chalmers Univ. of Techn.), Porcher W. (Univ. Grenoble), Trabesinger S. (PSI), Wohlfahrt-Mehrens M., Zhang H. (CIC EnergieGUNE); **Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments**; Journal of Power Sources 479 (2020) 228708; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228708>
- / Binder M., Mandl M. (KIT), Zaubitzer S., Wohlfahrt-Mehrens M., Passerini S. (KIT), Böse O., Danzer M. (Univ. Bayreuth), Marinaro M.; **Sodium cyclopentadienide as a new type of electrode for sodium batteries**; ChemElectroChem 2020; <https://doi.org/10.1002/celec.202001290>
- / Buttermann H.-G. (EEFA), Baten T. (EEFA), Nieder T.; **Methodische Konsequenzen der gegenwärtig praktizierten Behandlung von Stromspeichern in der Energiebilanz**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 70. Jg. (2020) Heft 1/2
- / Carbonari G., Müller V., Scurtu R., Memm M., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Communication – Edge quality contribution on the electrical impedance of lithium-ion batteries electrodes**; Journal of the Electrochemical Society 167 (2020) 080504; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8875>
- / De Sutter L. (VUB), Berckmans G. (VUB), Marinaro M., Wohlfahrt-Mehrens M., Bercibar M. (VUB), Van Mierlo J. (VUB); **Mechanical behavior of silicon-graphite pouch cells under external compressive load: Implications and opportunities for battery pack design**; Journal of Power Sources 451 (2020) 227774; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227774>
- / Dongmo S., Zaubitzer S., Schüler P. (Univ. Jena), Kriech S. (Univ. Jena), Jörissen L., Wohlfahrt-Mehrens M., Westerhausen M. (Univ. Jena), Marinaro M.; **Stripping and plating a magnesium metal anode in bromide-based non-nucleophilic electrolytes**; ChemSusChem 13 (2020) 3530-3538; <https://doi.org/10.1002/cssc.202000249>
- / Döring H., Klee Barillas J., Wagner A.; **Gefährdungsbetrachtung von Speichersystemen in PV-Anlagen durch Wasser und dessen potentielle Auswirkung auf den Batteriespeicher**; Wasser und Abfall, 10/2020
- / Essig S., Paetel S., Magorian Friedlmeier T., Powalla M.; **Challenges in the deposition of (Ag,Cu)(In,Ga)Se₂ absorber layers for thin-film solar cells**; Journal of Physical Materials 4 (2021) 024003; <https://doi.org/10.1088/2515-7639/abd73d>
- / Flügel M., Waldmann T., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Detection of copper deposition on anodes of over-discharged lithium ion cells by GD-OES depth profiling**; ChemPhysChem 2020, 21, 2047-2050; <https://doi.org/10.1002/cphc.202000333>
- / Hogg B.-I. (SGL Carbon), Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **4-electrode full cells for operando Li⁺ activity measurements and prevention of Li deposition in Li-ion cells**; Journal of the Electrochemical Society 167 (2020) 9090525; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8976>
- / Hogrefe C., Hein S. (DLR), Waldmann T., Danner T. (DLR), Richter K., Latz A. (DLR), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Mechanistic details of the spontaneous intercalation of Li metal into graphite electrodes**; Journal of the Electrochemical Society 167 (2020) 140546
- / Ince U. (HZB), Markötter H. (HZB), Ge N. (TEAM), Klages M., Haußmann J., Göbel M. (VW), Scholta J., Bazylak A. (TEAM), Manke I. (HZB); **3D classification of polymer electrolyte membrane fuel cell materials from in-situ X-ray tomographic datasets**; International Journal of Hydrogen Energy, 45 (2020), 12161-12169; <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.136>
- / Jin X. (KIT), Schneider R. (KIT), Popescu R. (KIT), Hariskos D., Witte W., Powalla M., Gerthsen D. (KIT); **Characterization of solution-grown and sputtered (In_xO₂S)_y buffer layers in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells by analytical TEM**; Journal of Semiconductor Science and Technology, 2020 Vol 35 No. 3; <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ab6159>
- / Jobst N., Hoffmann A., Klein A. (SGL Group), Zink S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Ternary cathode blend electrodes for environmentally friendly lithium ion batteries**; ChemSusChem 13 (2020) 3928-3936; <https://doi.org/10.1002/cssc.202000251>
- / Kanevce A., Paetel S., Hariskos D., Friedlmeier T.; **Impact of RbF-PDT on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with CdS and Zn(O,S) buffer layers**; European Physical Journal Photovoltaics, 11 (2020); <https://doi.org/10.1051/epjpv/2020005>
- / Keppeler M., Roessler S., Braunwarth W.; **Production research as key factor for successful establishment of battery production on the example of large-scale automotive cells containing nickel-rich LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O₂ electrodes**; Special Collection: Energy Storage and Conversion Research at Science City Ulm, Energy Technology, 8 (2020) 2000183; <https://doi.org/10.1002/ente.202000183>
- / Kottam P., Dongmo S., Wohlfahrt-Mehrens M., Marinaro M.; **Effect of salt concentration, solvent donor number and coordination structure on the variation of the Li/Li⁺ potential in aprotic electrolytes**; Energies 13 (2020) 1470; <https://doi.org/10.3390/en13061470>
- / Kremer L., Danner T. (DLR), Hein S. (DLR), Hoffmann A., Prifling B. (Univ. Ulm), Schmidt V. (Univ. Ulm), Latz V. (DLR), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of the electrolyte salt concentration on the rate capability of ultra-thick NCM 622 electrodes**; Batteries & Supercaps 3 (2020) 1172-1182; <https://doi.org/10.1002/batt.202000098>
- / Kremer L., Hoffmann A., Danner T. (DLR), Hein S. (DLR), Prifling B. (Univ. Ulm), Westhoff D. (Univ. Ulm), Dreer C., Latz A. (DLR), Schmidt V. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Manufacturing process for improved ultra-thick cathodes in high-energy lithium-ion batteries**; Energy Technology 8 (2020) 1900167; <https://doi.org/10.1002/ente.201900167>
- / Kriston A. (JRC), Kersys A. (JRC), Antonelli A. (JRC), Ripplinger S. (JRC), Holmstrom S. (JRC), Trischler S., Döring H., Pfrang A. (JRC); **Initiation of thermal runaway in lithium-ion cells by inductive heating**; Journal of Power Sources 454 (2020) 227914; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.227914>
- / Löffler M.-S., Steiert S.; **Positive Zwischenbilanz bei industrieller P2G-Anlage am Hochrhein**; emw – Energie Markt Wettbewerb, Ausgabe Juni 2020
- / Löschel A. (Univ. Münster), Grimm V. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Lenz B. (DLR), Staiß F.; **Klimaschutz vorantreiben, Wohlstand stärken – Kommentierung zentraler Handlungsfelder der deutschen Energiewende im europäischen Kontext**; Berlin, Münster, Nürnberg, Stuttgart, Juni 2020; <https://www.bmwj.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/monitoring-prozess.html>
- / Marinaro M., Bresser D. (KIT), Beyer E. (BMBF), Faguy P. (DOE), Hosoi K. (NEDO), Skovica J. (EC), Amine K. (ANL), Wohlfahrt-Mehrens M., Passerini S. (KIT); **Bringing forward the development of battery cells for automotive applications: Perspective of R&D activities in China, Japan, the EU and the USA**; Journal of Power Sources 459 (2020) 228073; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228073>
- / Mohanta P., Regnet F., Jörissen L.; **Impact of highly stable catalyst support materials on polymer electrolyte membrane fuel cell performance**; Energy Technology 8 (2020) 2000081; <http://doi.org/10.1002/ente.202000081>
- / Mohanta P., Ripa M., Regnet F., Jörissen L.; **Impact of membrane types and catalyst layers composition on performance of polymer electrolyte membrane fuel cells**; ChemistryOpen 2020, 9, 607-615; <http://doi.org/10.1002/open.202000089>
- / Mohseninia A., Kartouzian D., Schlumberger R. (ZSW/Audi), Markötter H. (HZB), Wilhelm F., Scholta J., Manke I. (HZB); **Enhanced water management in PEMFCs: Perforated catalyst layer and microporous layers**; ChemSusChem, 13 (2020) 2931-2934 (Cover Feature); <https://doi.org/10.1002/cssc.202000542>
- / Müller V., Bernhard R. (Wacker), Wegener J. (Wacker), Pfeiffer J. (Wacker), Rössler S., Scurtu R.-G., Memm M., Danzer M. (Univ. Bayreuth), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Evaluation of scalable porous Si-rich Si/C-composites with low volume expansion in coin cells to prismatic cell formats**; Energy Technology 8 (2020) 2000217; <https://doi.org/10.1002/ente.202000217>
- / Nardone M. (BGSU), Patikirige Y. (BGSU), Kweon K. (LLNL), Walkons C. (Univ. Las Vegas), Friedlmeier T., Varley J. (LLNL), Lordi V. (LLNL), Bansal S. (Univ. Las Vegas); **Quantifying large lattice relaxations in photovoltaic devices**; Physical Review Applied, 13 024025 (2020); <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.13.024025>
- / Nikolaeva A. (HZB), Krause M. (HZB), Schäfer N. (HZB), Witte W., Hariskos D., Kodalle T. (HZB), Kaufmann A. (HZB), Barreau N. (IMN), Abou-Ras D. (HZB); **Electrostatic potential fluctuations and light-soaking effects in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; Progress in Photovoltaics 28 (2020) 919-934; <https://doi.org/10.1002/pip.3299>
- / Richter K., Waldmann T., Paul N. (TUM), Jobst N., Scurtu R., Hofmann M. (TUM), Gilles R. (TUM), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Low-temperature charging and aging mechanisms of Si/C composite anodes in Li-Ion batteries: An operando neutron scattering study**; ChemSusChem 13 (2020) 529-538; <https://doi.org/10.1002/cssc.201903139>
- / Siebentritt S. (Univ. Luxemb.), Avancini E. (Empa), Bär M. (HZB), Bombsch J. (HZB), Bourgeois E. (IMO-IMOMEC), Buecheler S. (Empa), Carron R. (Empa), Castro C. (Univ. Rouen), Duguay S. (Univ. Rouen), Félix R. (HZB), Handick E. (HZB), Hariskos D., Havu V. (Aalto Univ.), Jackson P., Komsa H.-P. (Aalto Univ.), Kunze T. (HZB), Malitckaya M. (Aalto Univ.), Menozzi R. (Univ. Parma), Nesladek M. (IMO-IMOMEC), Nicoara N. (INL), Puska M. (Aalto Univ.), Raghuvanshi M. (Univ. Rouen), Pareige P. (Univ. Rouen), Sadewasser S. (INL), Sozzi G. (Univ. Parma), Tiwari A. (Empa), Ueda S. (HZB), Vilalta-Clemente A. (Univ. Rouen), Werner F. (Univ. Luxemb.), Wilks R. (HZB), Witte W., Wolter M. (Univ. Luxemb.); **Heavy alkali treatment of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells: Surface versus bulk effects**; Advanced Energy Materials 10 (2020) 1903752; <http://dx.doi.org/10.1002/aeem.201903752>
- / Waldmann T., Scurtu R., Richter K., Wohlfahrt-Mehrens M.; **18650 vs. 21700 Li-ion cells - A direct comparison of electrochemical, thermal and geometrical properties**; Journal of Power Sources 472 (2020) 228614; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228614>
- / Yoon D.-H., Marinaro M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Study of the binder influence on expansion/contraction behavior of silicon alloy negative electrodes for lithium-ion batteries**; Journal of the Electrochemical Society 167 (2020) 160537; <https://doi.org/10.1149/1945-7111/abcf4f>
- / Zuberbühler U., Baumgart F., Thaler S., Feigl B., Stürmer B.; **CORAL: CO₂-Rohstoff aus Luft: Entwicklung eines hocheffizienten Verfahrens zur CO₂-Bereitstellung aus Luft als Basis für die Erzeugung regenerativer Rohstoffe**; Schlussbericht, Stuttgart, August 2020

// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications

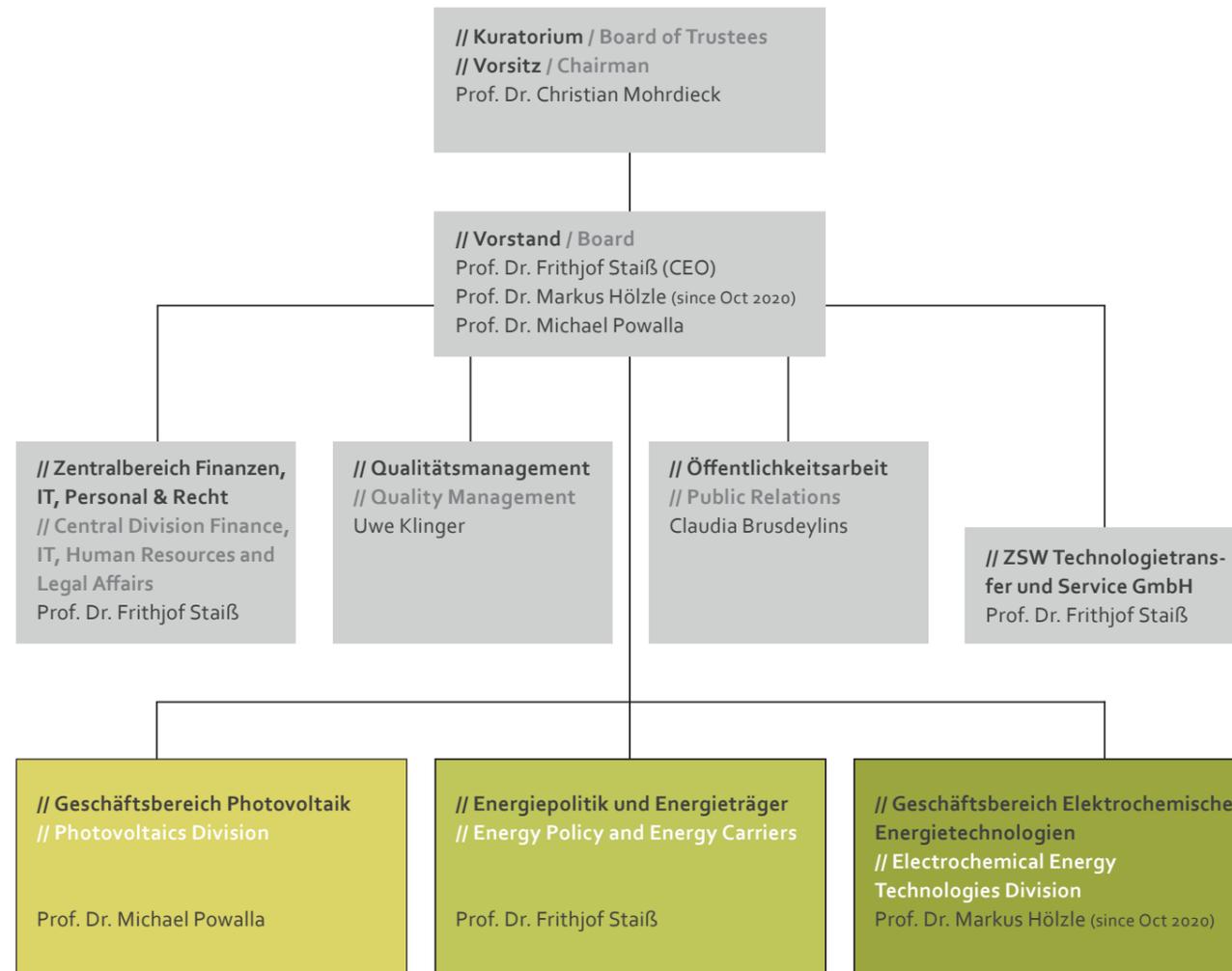
// VERÖFFENTLICHUNGEN AUF WISSENSCHAFTLICHEN KONFERENZEN, WORKSHOPS UND SYMPOSIEN PUBLICATIONS AT SCIENTIFIC CONFERENCES, WORKSHOPS AND SYMPOSIA

- / Axmann P.; **Aktivmaterialien für die Lithium-Ionen-Batterie – vom Partikeldesign zur Zellperformance**; Batterieforum 2020, Berlin, 22.-24.1.2020
- / Bauer A., Hünig R. (extern), Paetel S., Sehnke F.; **Machine learning for CIGS process development**; 37th EU PVSEC 2020, online, 7-11 Sept. 2020
- / Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Kindl V., Löffler M.-S., Schmidt M., Staiß F.; **Technologie-Workshopreihe im Rahmen des Projekts BW Elektrolyse**; online, Okt./Nov. 2020; www.bw-elektrolyse.de/veranstaltungen
- / Becher D., Böse O., Menz F., Däubler N., Bauer M., Döring H., Friess B. (Mercedes Benz); **Possibilities to suppress the thermal propagation in lithium-ion cell modules**; AABC Europe 2020, Wiesbaden, 12.1.2020
- / Becher D., Böse O., Menz F., Döring H., Danzer M., Friess B. (Mercedes Benz), Bauer M.; **Experimental investigation to prevent thermal runaway propagation in lithium-ion cell modules**; Batteries Event 2020, 22nd Edition, Lyon, 7-9 Oct. 2020
- / Brinner A.; **Alkalische Elektrolysetechnik – Aktueller Stand/Nutzung/ Perspektive**; Seminar „Erneuerbare Energien“, HS Karlsruhe, Fakultät Elektro- / Informationstechnik, online, 20.5.2020
- / Brinner A.; **Technische Umsetzungsplanung von Wasserstoff-Strukturen und Anlagen**; Smart-Grids-Gespräche, H2 in der Sektorkopplung und in Quartieren, Smart Grids BW, 14.10.2020
- / Brinner A., Löffler M.-S.; **Ist die Produktion und der Einsatz von Wasserstoff technisch sicher möglich?**; Evonik H2-Konferenz Rheinfelden: Von der Vision zu konkreten Projektideen, 12.3.2020
- / Brinner A., Löffler M.-S., Spieth P.; **Scale-up of Electrolysers**; Dechema Virtual Talks: CHEM ampere, 12 Nov. 2020
- / Döring H., Wörz M., Köhler N., Spachmann K., Klee Barillas J.; **Unkontrollierte Energiefreisetzung in Li-Batterien**; Fachkonferenz Batterielogistik, Göttingen, 22-23 Jan. 2020
- / Huschenhöfer D., Wenske J., Mieser J., Binder J.; **Intelligente Ladeinfrastruktur (LIS) für Elektrofahrzeuge in Parkhäusern und Tiefgaragen**; 9. Kolloquium Parkbauten der Technischen Akademie Esslingen, 4.-5.2.2020
- / Jacobs N. (DLR), Dyck A. (DLR), Robinius M. (FZJ), Pilz P. (GFZ), Schmidt-Hattenberger C. (GFZ), Then D. (IEE), Kneiske T. (IEE), Smolinka T. (ISE), Hauser E. (IZES), Wetzel T. (KIT), Graf F. (KIT), Jenne M.; **Wasserstoff als Fundament der Energiewende für den Brückenschlag zwischen den Sektoren**; FVEE-Jahrestagung 2020: Forschung für den European Green Deal, online, 2.-4.11.2020; https://www.fvee.de/fileadmin/veranstaltungen/Vortraege_JT20/3.1_FVEE_Jacobs.pdf
- / Jörissen L.; **Generischer Brennstoffzellenstack**; FVV Herbsttagung, online, 21.9.-1.10.2020
- / Kanevce A., Paetel S., Hariskos D., Walkons C. (Univ. of Nevada), Bansai S. (Univ. of Nevada), Friedlmeier T.; **Can RbF-PDT treatment eliminate the disadvantage of Zn(O,S) buffer layer in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells?**; Virtual Chalcogenide PV Conference 2020, online, 25-28 May 2020
- / Klee Barillas J., Döring H.; **Investigation of fire extinguishing strategies to prevent fire spread**; 6th Residential Energy Storage Forum, München, 31 March – 2 April 2020
- / Küffner J., Wahl T., Schultes M., Hanisch J., Zillner J., Ahlswede E., Powalla M.; **Nanoparticle wetting agent for gas stream-assisted blade coated inverted perovskite solar cells and modules**; nanoGe Fall Meeting (Online Conference) 20-23 Oct. 2020
- / Lechner P., Hummel S., Schnepf J., Geyer D.; **Extreme Prüfung der PID-Beständigkeit von PV-Modulen mit 1500-V-Spannung**; 35. Symposium Photovoltaische Solarenergie, online, 1.-2.9.2020
- / Lechner P., Kessler F., Stellbogen D., Gallina J. (TubeSolar), Mayer J. (TubeSolar); **Tubular photovoltaics for agrivoltaic application**; Agrivoltaics2020, online, 14-16 Oct. 2020
- / Lechner P., Schnepf J., Geyer D., Hummel S., Wittfoth J. (CS Wismar), Merino Martinez R. (STR Espana), Sanchez-Friera P. (IDONIAL); **Extreme testing of PID resistive c-Si PV modules with 1500 V system voltage**; 37th EU PVSEC 2020, online, 7-11 Sept. 2020
- / Loy M., Ahlswede E.; **Perovskite-CIGS 4T tandem solar cells with thin TCO electrodes**; nanoGe Fall Meeting (Online Conference) 20-23 Oct. 2020
- / Matthiss B., Felder M., Binder J.; **Einfluss der Unsicherheit der Erzeugungs- und Lastprognose auf die Betriebseffizienz eines virtuellen Kraftwerks im Quartier**; 35. Symposium Photovoltaische Solarenergie, online, 1.-2.9.2020
- / Matthiss B., Huschenhöfer D., Ebe F. (STZ THU), Casel M. (STZ THU), Heilscher G. (STZ THU); **Verteilnetze optimiert betreiben: Demonstration des vorausschauenden Netzbetriebs und Steuerung dezentraler Komponenten**; 35. Symposium Photovoltaische Solarenergie, online, 1.-2.9.2020
- / Paetel S., Lotter E., Hariskos D., Wischmann W., Powalla M.; **Growth at high deposition rates: CIGS and secondary phases**; 37th EU PVSEC 2020, online, 7-11 Sept. 2020
- / Petzschmann J., Metzger J., Binder J., Pfeil A. (SW Ludwigsburg-Kornwesth.); **Herausforderung einer dezentralen sektorenübergreifenden Versorgung im bestehenden Gewerbequartier**; 35. Symposium Photovoltaische Solarenergie, online, 1.-2.9.2020
- / Rongstock R., Schwarz S., Fidaschek S., Vöhringer R. (Hymer GmbH); **Photovoltaik und Batteriespeicher als Basis innovativer Energiekonzepte am Reisemobil: nachhaltiges und unabhängiges Reisen & netzdienliche Doppelnutzung der Reisemobil-Bordbatterie**; 35. Symposium Photovoltaische Solarenergie, online, 1.-2.9.2020
- / Röbller S., Tran H., Aracil-Regalado A., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M., Braunwarth W.; **Integration und Validierung innovativer Prozesse für eine seriennahe Produktion von großformatigen Li-Ionen-Zellen**; Batterieforum 2020, Berlin, 22.-24.1.2020
- / Röbller S., Tran H., Blessing M., Braunwarth W.; **Filling and formation of large li-ion cells - where scaling up is non-linear**; 3rd International Battery Production Conference 2020, online, 2 Oct. 2020
- / Röbller S., Tran H., Blessing M., Braunwarth W.; **Quality assurance in the highly dynamic battery production landscape – electrodes and assemblies**; ZwickRoell testXpo 2020, Virtual Testing Forum
- / Schnabel T., Busch L., Salomon O., Vocht M. (DITF), v. Metzner R. (NMI); **Stability of encapsulated perovskite solar cells**; Perovskite Solar Cells, Photonics and Optoelectronics, Sevilla, 23-25 Feb. 2020
- / Schneider T. (DLR), Sigle S. (DLR), Huschenhöfer D.; **Car usage in the fleet of a regional council and need for intelligent charging infrastructure**; 4th E-Mobility Power System Integration Symposium, online, 3 Nov. 2020
- / Schnepf J., Lechner P., Hummel S., Wirth H., Stellbogen D.; **Analysis of field aged PV modules with PET based backsheets regarding their mechanical stability**; 37th EU PVSEC 2020, online, 7-11 Sept. 2020
- / Scholta J., Messerschmidt M., Jörissen L.; **Advanced investigation methods on automotive-related PEMFC stacks**; 12th Expert Forum Electric Vehicle Drives, online, 15-17 Sept. 2020
- / Scholta J., Winterhagen J. (FVV); **Einer für alle – Entwicklung eines generischen Brennstoffzellen-Stacks**; FVV Prime Movers, 30.4.2020; <https://www.primemovers.de/de/handeln/einer-fuer-alle>
- / Steiert S., Löffler M.-S., Brinner A., Heger D., Ficht S. (Energiedienst); **Technisches Monitoring und Analyse einer industriellen Power-to-Hydrogen-Anlage zur Erzeugung strombasierter Wasserstoffs**; 10th ProcessNet-Jahrestagung – Processes for Future, online, 21-24 Sept. 2020
- / Tomschitz C., Zoll M., Felder M., Binder J., Längle T. (SW Schwäbisch Hall), Schulze K. (SW Schwäbisch Hall), Breuning P. (SW Schwäbisch Hall); **PV-Prognosen für die Netzleitwarte Schwäbisch Hall – Methoden und technische Umsetzung**; 35. Symposium Photovoltaische Solarenergie, online, 1.-2.9.2020
- / Witte W., Hariskos D., Hempel W., Paetel S., Maiberg M. (Univ. Halle-Wittenberg), Zahedi-Azad S. (Univ. Halle-Wittenberg), Pistor P. (Univ. Halle-Wittenberg), Scheer R. (Univ. Halle-Wittenberg), Hauschild D. (KIT), van Maris V. (KIT), Blankenship M. (UNLV), Weinhardt L. (KIT), Heske C. (KIT), Keutgen J. (RWTH), Cojocar-Miredin O. (RWTH), Ghorbani E. (TU Darmstadt), Albe K. (TU Darmstadt), Jin X. (KIT), Schneider R. (KIT), Gertsen D. (KIT), Nikolaeva A. (HZB), Marquez-Prieto J. (HZB), Krause M. (HZB), Schäfer S. (HZB), Abou-Ras D. (HZB), Unold T. (HZB), Mainz R. (HZB), Seeger J. (KIT), Hetterich M. (KIT), Eraerds P. (AVANCIS), Niesen T. (AVANCIS), Lechner R. (AVANCIS), Dalibor T. (AVANCIS), Palm J. (AVANCIS), Schweiger M. (NICE), Dimmler B. (NICE), Henke T. (Solibro), Kratzert P. (Solibro), Powalla M.; **Design and in-depth characterization of absorber/buffer interfaces of CIGS solar cells: Results of the EFFCIS project**; 37th EU PVSEC 2020, online, 7-11 Sept. 2020
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **Process development for electrode and cell manufacturing of high energy lithium-ion batteries, Award Lecture**; IBA 2020, online, 17-18 Nov. 2020
- / Zillner J., Ahlswede E., Powalla M.; **Interface optimization in FASnI₃ perovskite solar cells**; nanoGe Fall Meeting (Online Conference) 20-23 Oct. 2020

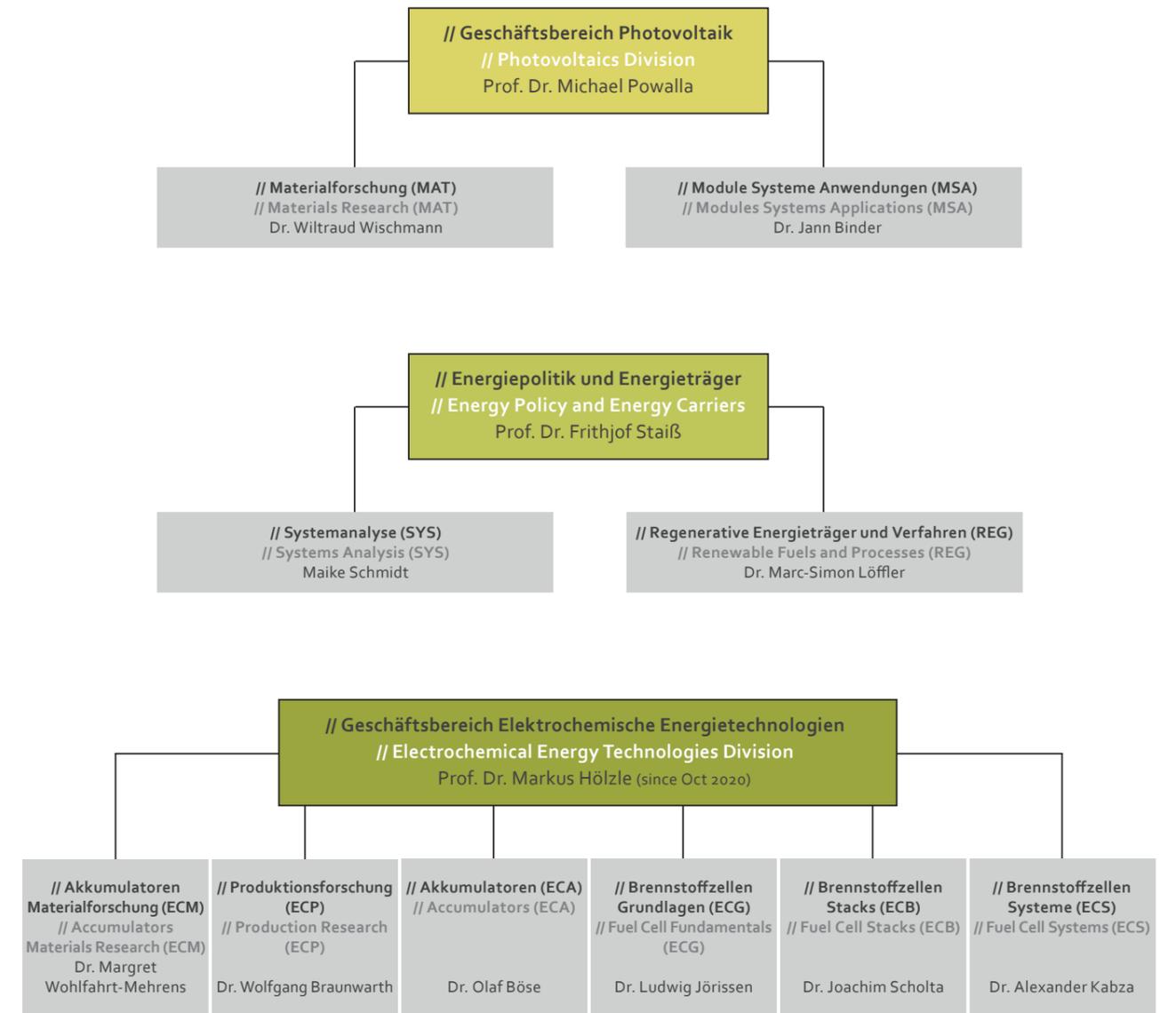
// Organigramme

Organisational Charts

// ORGANIGRAMM DES INSTITUTS
ZSW ORGANISATIONAL CHART



// ORGANIGRAMME DER GESCHÄFTSBEREICHE
// ORGANISATIONAL CHARTS OF THE DIVISIONS



// Standorte

Locations

// STUTTGART



Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart

Ansprechpartnerin / Contact

Claudia Brusdeylins

Phone: +49 711 7870-278

E-mail: claudia.brusdeylins@zsw-bw.de

// WIDDERSTALL



Widderstall 14
89188 Merklingen

// ULM



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

Ansprechpartnerin / Contact

Tiziana Bosa

Phone: +49 731 9530-601

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

// ULM ELAB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

// Abkürzungen

Abbreviations

// FIRMEN, INSTITUTE, INSTITUTIONEN

// COMPANIES, INSTITUTES, INSTITUTIONS

ANL	Argonne National Laboratory
BfN	Bundesamt für Naturschutz / German Federal Agency for Nature Conservation
BGSU	Bowling Green State University
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung / German Federal Ministry of Education and Research
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur / German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie / German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy
CELEST	Center for Electrochemical Storage Ulm & Karlsruhe
CEP	Clean Energy Partnership
CIC	Centro de Investigación Cooperativa (Cooperative Research Centre) EnergiGUNE
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DITF	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DOE	Department of Energy
EC	European Commission
EEFA	Energy Environment Forecast Analysis GmbH & Co. KG
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EU PVSEC	European PV Solar Energy Conference and Exhibition
FPL	Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen / Research Platform for Industrial Production of Large Lithium-Ion Cells
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
FZJ	Forschungszentrum Jülich GmbH
GFZ	Deutsches GeoForschungszentrum
HIU	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
HS	Hochschule
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IBA	International Battery Association
IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
IMN	Institut des Matériaux Jean Rouxel de Nantes
IMO-IMOMEC	Institute for Materials Research-(Institute for Materials Research in MicroElectronics)
INL	International Iberian Nanotechnology Laboratory
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISO	International Organization for Standardization
IZES	Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH
JRC	Joint Research Center
KIT	Karlsruher Institut für Technologie / Karlsruhe Institute of Technology
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MIT	Mittelstands- und Wirtschaftsunion
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
NMI	Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut
NPL	National Physical Laboratory
POLiS	Post Lithium Storage
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SAE	Society of Automotive Engineers
SINTEF	Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning ved NTH
STR	Specialized Technology Resources España
STZ THU	Steinbeis Transferzentrum an der Technischen Hochschule Ulm
SW	Stadtwerke
TEAM	Thermofluids for Energy and Advanced Materials Laboratory, University of Toronto
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
UECT	Ulmer ElektroChemische Tage – Ulm ElectroChemical Talks
UNLV	University of Nevada Las Vegas
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.

VUB	Vrije Universiteit Brussel
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süddeutschland
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH

// TECHNISCHE BEGRIFFE

// TECHNICAL TERMS

AC	Alternating Current / Wechselstrom
ACIGS	Silber-Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
AI	Artificial Intelligence
ALD	Atomic Layer Deposition
BEV	Battery Electric Vehicle / Batteriefahrzeug
BIPV	Bauwerkintegrierte Photovoltaik / Building-Integrated Photovoltaics
BMS	Batteriemanagementsystem / Battery Management System
BPP	Bipolarplatte / Bipolar Plate
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHP	Combined Heat and Power
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CV	Cyclic voltammogram – Zyklisches Voltammogramm
DC	Direct Current / Gleichstrom
DEM	Diskrete-Elemente-Methode / Discrete-Element-Method
FA	Formamidinium
FIB - SEM	Focused Ion Beam – Scanning Electron Microscope
GDL	Gas Diffusion Layer / Gasverteilerschicht
GD-OES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy / Optische Glimmentladungsspektroskopie
HGV	Heavy-Goods Vehicle
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
LFP	Lithium-Eisenphosphat / Lithium iron phosphate
LMFP	Lithium-Mangan-Eisenphosphat / Lithium Manganese Iron Phosphate
LMNS	Lithium-Mangan-Nickel-Spinell / Lithium manganese oxide spinel
LMO	Lithium-Mangan-Oxid(-Spinell)
LMP	Lithium-Metall-Polymer-Akkumulator / Lithium metal polymer accumulator
LNG	Liquefied Natural Gas
MEA	Membrane Electrode Assembly / Membran-Elektroden-Einheit
ML	Maschinelles Lernen / Machine Learning
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium / Nickel-Cobalt-Aluminium
NCM	Nickel-Kobalt-Mangan / Nickel-Cobalt-Manganese
NFZ	Nutzfahrzeug
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt / Nickel-Manganese-Cobalt
NMP	N-Methyl-2-Pyrrolidone
P2X	Power-to-X
PDT	Post Deposition Treatment
PEFC	Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran / Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell / Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PET	Polyethylenterephthalat
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PID	Potenzialinduzierte Degradation / Potential-Induced Degradation
PtX	Power-to-X
P-t-X	Power-to-X
PV	Photovoltaik / Photovoltaics
R&D	Research and Development
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SEM	Scanning Electron Microscope
SME	Small and Medium-sized Enterprises
TCO	Transparent Conductive Oxide
TEM	Transmissionselektronenmikroskopie / Transmission Electron Microscopy
TP	Thermische Propagation / Thermal Propagation
t-SNE	t-distributed Stochastic Neighbor Embedding
VOF	Volume of Fluid

// Mitgliedschaften
// ZSW is a member of



AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
AKK	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
Allianz BIPV	Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V.
BVES	Bundesverband Energiespeicher e. V.
Cluster BZ BW	Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg
CPN	Clean Power Net
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DIN	DIN Arbeitsausschuss Wasserstofftechnologien
DPP	Deutsche Phosphor-Plattform e. V.
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V.
ECS	Electrochemical Society
EERA	European Energy Research Alliance
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.
ESPP	The European Sustainable Phosphorus Platform
EUREC	The Association of European Renewable Energy Centres
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
H2 Süd	H2 Süd e.V. – Die Wasserstoff-Initiative Bayern & Baden-Württemberg
Hydrogen Europe	Hydrogen Europe Research
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien e. V.
OpenEMS	OpenEMS Association e. V.
PEE	Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg
performing energy	Fachkommission des DWV e. V. Power-to-Fuel
Plattform P Rück	DWA Landesverband Baden-Württemberg
SmartGridsBW	SmartGrids-Plattform Baden-Württemberg e. V.
SolarCluster	Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
SolarPower	SolarPower Europe
STRise	Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy
UNW	Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e. V.
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDMA	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süddeutschland

// Impressum
// Imprint

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

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

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

// Redaktion Editors
Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Gudrun Scherg
Ulrike Witt

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



Der Jahresbericht wurde auf FSC-zertifiziertem Papier gedruckt. This annual report was printed on FSC-certified paper.

Stuttgart

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

Solar-Testfeld Widderstall

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

Ulm

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

www.zsw-bw.de



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