

// Ergebnisse
Results

2018

ZSW

30
ZSW
1988-2018

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / Our Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	Erfolge 2018 / Achievements in 2018
14	30 Jahre ZSW / 30 Years of ZSW
16	Schwerpunktbericht / Focus Report Wege zur klimaneutralen Mobilität On the way towards climate-neutral mobility
32	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
34	Systemanalyse / Systems Analysis
38	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
42	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
46	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
50	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
54	Produktionsforschung / Production Research
56	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

Die Bundesregierung hat sich in ihrem Koalitionsvertrag auf die Einhaltung sektoraler Klimaschutzziele für das Jahr 2030 verpflichtet. Für die Energiewirtschaft könnte dies mit dem sukzessiven Kohleausstieg und dem Ausbau der Erneuerbaren auf einen Anteil von 65 % gelingen. Große Herausforderungen bestehen allerdings in den anderen Sektoren, insbesondere im Verkehr. Hier geht es nicht zuletzt um die Einhaltung der Vorgaben der EU Climate Action Regulation und zur Absenkung der CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und Lkw.

Für uns ist dies der Anlass, im Schwerpunkt unseres Jahresberichts „Wege zur klimaneutralen Mobilität“ aufzuzeigen: Wie können wir mit unseren Arbeiten dazu beitragen, die CO₂-Emissionen im Verkehr in den nächsten zwölf Jahren um etwa 40 % zu reduzieren? Wie gelingt es, den Energiebedarf von Pkw durch Hybridisierung und alternative Antriebe auf im Mittel etwa drei Liter Benzinäquivalent zu senken? Welche Rolle können sog. E-Fuels, d. h. auf regenerativ erzeugtem Strom basierende Kraftstoffe, für den Fahrzeugbestand spielen?

Der Jahresbericht präsentiert darüber hinaus weitere wissenschaftliche Highlights zur Photovoltaik und Windenergie sowie der Sektorenkopplung, zur Entwicklung kobaltfreier Batterien und eines ZSW-eigenen Elektrolyseurs ebenso wie die Arbeiten zur Kommerzialisierung von Brennstoffzellen bis hin zum Monitoring der Energiewende auf Bundes- und Landesebene.

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

In its coalition agreement, the German government has committed itself to meeting sectoral climate protection targets for the year 2030. For the energy industry, this could be achieved by gradually phasing out coal and expanding renewables to reach a 65% share. However, there are major challenges in the other sectors, especially transport. Here, complying with the requirements of the EU Climate Action Regulation and reducing CO₂ fleet limits for cars and lorries are just some of the issues at stake.

This is our motivation to highlight “ways towards climate-neutral mobility” as a focus issue of our Annual Report: how can our research and development activities help reduce CO₂ emissions from transport by around 40% over the next twelve years? How can we use hybridisation and alternative drive systems to reduce the energy requirements of passenger cars to an average of around the equivalent of three litres of petrol? What role can e-fuels, in other words fuels based on renewable electricity, play in the vehicle fleet?

The annual report also presents further scientific highlights in photovoltaics and wind energy together with sector coupling, the development of cobalt-free batteries and ZSW’s own electrolyser, as well as work on the commercialisation of fuel cells and the monitoring of the energy transition at the federal and state level.

We are delighted about the continued high interest in our work, which we experience in many discussions and gratifyingly detailed media coverage. 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. Werner Tillmetz

Nach 14 Jahren als Vorstandsmitglied und Leiter des Geschäftsbereichs Elektrochemische Energietechnologien ging Prof. Dr. Werner Tillmetz im September 2018 in den Ruhestand.

Vor 14 Jahren spielten Batterien und Brennstoffzellen sowohl in der Forschung als auch in der industriellen Umsetzung und der Anwendung noch eine untergeordnete Rolle. Als 2008 die Dynamik zur Elektromobilität einsetzte, nutzte Werner Tillmetz die Chancen, um die Batterieforschung am ZSW deutlich auszubauen: So wurde auf 10.000 Quadratmetern Fläche der Neubau des „ZSW Labors für Batterietechnologie (eLaB)“ realisiert und 2014 ging die größte europäische „Forschungsplattform zur industrienahen Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“ in Betrieb. Parallel hat sich die Belegschaft auf heute 140 Personen aus 13 Nationen nahezu verdreifacht. Auch mit Brennstoffzellen geht es seit einigen Jahren weltweit bergauf. Das ZSW konnte sich mit wichtigen Projekten zur Hochleistungsbrennstoffzelle für Fahrzeuge und zur Wasserstoff-Betankung positionieren und steht aktuell davor, die Aktivitäten deutlich auszubauen.

Wichtig für den Erfolg von Werner Tillmetz war der Aufbau nationaler Strukturen, insbesondere der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW), des Kompetenznetzwerks Lithium-Ionen-Batterien (KLiB) sowie des Helmholtz-Instituts Ulm (HIU).

Besonderer Dank gilt Werner Tillmetz nicht nur, weil er entscheidend dazu beigetragen hat, den ZSW-Geschäftsbereich in Ulm zu einer festen Größe in der internationalen Forschungslandschaft auszubauen, sondern auch, weil er den Technologietransferauftrag des ZSW gemeinsam mit vielen Unternehmen erfolgreich umgesetzt hat.

Professor Werner Tillmetz retired in September 2018 after 14 years as a member of the Board and head of the Electrochemical Energy Technologies Division.

14 years ago, batteries and fuel cells still played a subordinate role in both research and industrial implementation and applications. When electromobility experienced an upswing in 2008, Werner Tillmetz grasped the opportunity to significantly expand battery research at ZSW: for example, the new “ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB)” was built on a 10,000 square metre area and, in 2014, the largest European “research platform for the industrial production of large lithium-ion cells (FPL)” went into operation. Parallel to this, the workforce has now almost tripled to 140 people from 13 nations. Fuel cells have also been on the rise worldwide for some years now. ZSW has been able to position itself with important projects on high-performance fuel cells for vehicles and hydrogen refuelling, and is currently on the verge of significantly expanding its activities.

The establishment of national structures was important for Werner Tillmetz’s success, in particular the National Organisation for Hydrogen and Fuel Cell Technology (NOW), the Lithium-Ion Batteries Competence Network (KLiB) and the Helmholtz Institute Ulm (HIU).

Special thanks go to Werner Tillmetz because he not only made a decisive contribution to expanding the ZSW division in Ulm into a permanent fixture in the international research landscape, but also because he successfully implemented ZSW’s mission to transfer technology, together with numerous companies.

// 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.“

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

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

- Stifter des ZSW / 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.
- Unternehmen / Commercial enterprises**

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

// Mitglieder des Kuratoriums

// Members of the Board of Trustees

- Vorsitzender / Chairman**

 - > Prof. Dr. Christian Mohrdieck

Stellvertreter / Vice Chairmen

 - > Prof. Dr. Uli Lemmer
 - > Prof. Dr.-Ing. Michael Weber
- Ministerien und Organisationen / Ministries and Organisations**

 - > Ministerialrätin Susanne Ahmed, 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
 - > Regierungsdirektor Dr. Christoph Rövekamp, Bundesministerium für Bildung und Forschung
 - > Dr.-Ing. Klaus Bonhoff, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
- Universitäten / Universities**

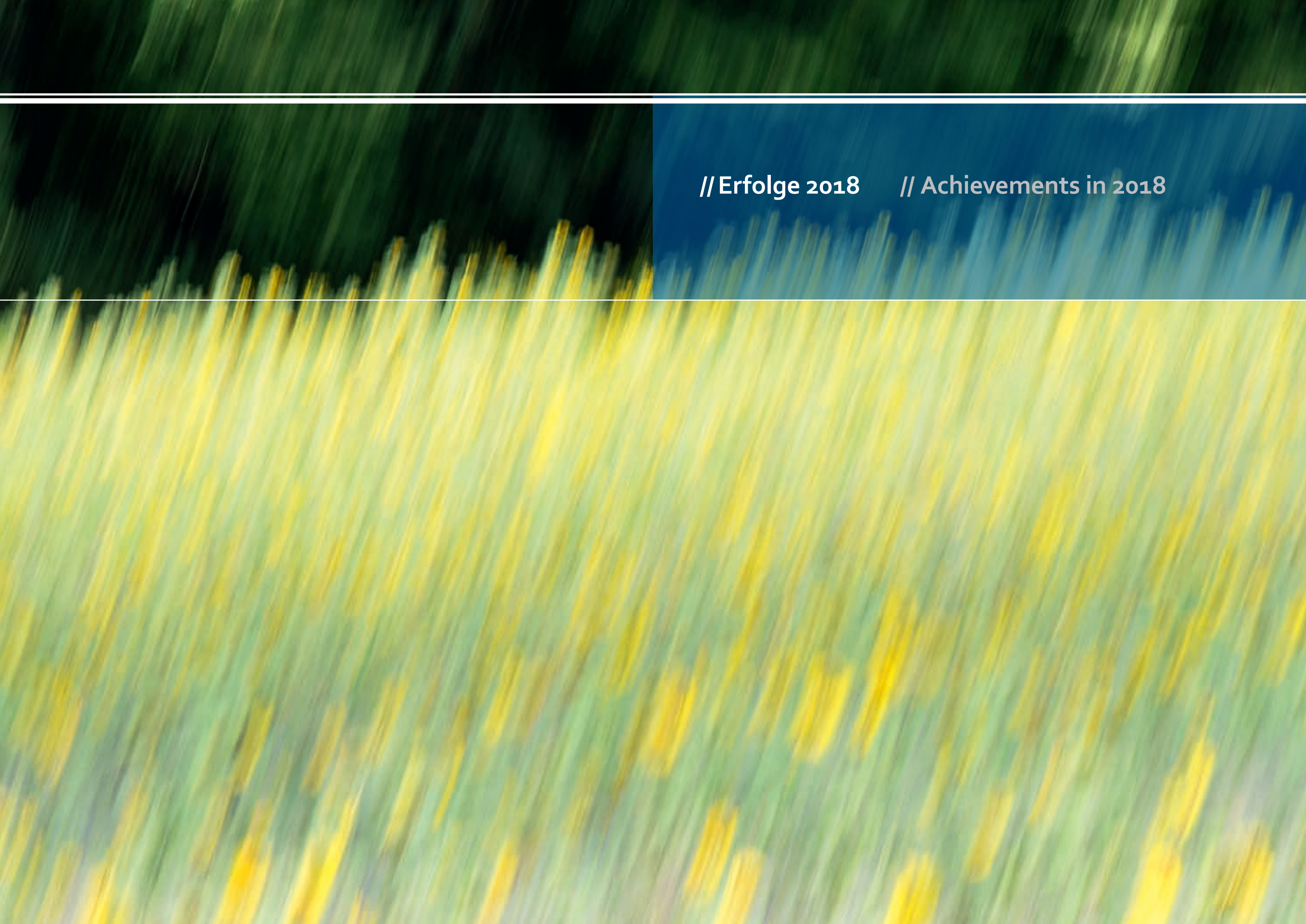
 - > Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel, Rektor der Universität Stuttgart
 - > Prof. Dr.-Ing. Michael Weber, Präsident der Universität Ulm
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt / German Aerospace Research Centre**

 - > Dipl.-Ing. Bernhard Milow, Programmdirektor Energietechnik
- Fraunhofer-Gesellschaft**

 - > Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- Wissenschaft / Science**

 - > Prof. Dr. Michael Auer, Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung
 - > Prof. Dr. habil. Ursula Eicker, Hochschule für Technik Stuttgart
 - > Prof. Dr. Angelika Heinzel, Universität Duisburg-Essen
 - > Prof. Dr. Uli Lemmer, Karlsruher Institut für Technologie
 - > Prof. Dr. Uwe Leprich, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
 - > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
- Wirtschaft / Commercial enterprises**

 - > Dipl.-Ing. (FH), MBA Klaus Eder, Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm
 - > Dr. Axel Heinrich, Volkswagen AG
 - > Dr. Winfried Hoffmann, Applied Solar Expertise
 - > Dr. Jürgen Kirschner, Robert Bosch GmbH
 - > Dr. Peter Lamp, BMW Group
 - > Dieter Manz, Manz GmbH Management Consulting and Investment
 - > Prof. Dr. Christian Mohrdieck, Daimler AG
 - > Prof. Dr. Wolfram Münch, Energie Baden-Württemberg AG
 - > Dipl.-Ing. Roland Pröger, Fichtner GmbH & Co. KG
 - > Dr. Günter von Au, Clariant SE
 - > Dipl.-Ing. Gregor Waldstein, GWA Beteiligungs- und Management GmbH

The background of the slide is an abstract composition of diagonal streaks in various shades of green, yellow, and blue, creating a sense of motion and energy.

//Erfolge 2018

// Achievements in 2018

// Erfolge 2018

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, effizienter 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 2018 wurden wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

// OECD „Big Data Analytics“ Challenge

ZSW-Wissenschaftler aus dem Bereich Systemanalyse entwickelten mit Kollegen der Universität Aalborg/Dänemark das Tool „Global Patent Explorer“ zur Analyse von globalen Innovationsaktivitäten. Damit gewannen sie die erste „Big Data Analytics“ Challenge der OECD im Bereich IP Statistics for Decision Makers (IPSDM). Der Global Patent Explorer ermöglicht die Visualisierung und geografische Verortung von erfinderischen Tätigkeiten rund um den Globus. Er basiert auf Forschungsarbeiten, die klassische Patentanalysen mit Methoden des maschinellen Lernens und dem sogenannten Natural Language Processing verbinden, um beispielsweise neuartige Qualitätsindikatoren für Patente zu generieren. Das Tool richtet sich an Experten aus dem Bereich der Politikberatung sowie Unternehmen und Investoren, die damit Trends der Technologieentwicklung identifizieren können. Aktuell wird der Global Patent Explorer von den ZSW-Wissenschaftlern zur Technologieanalyse und Innovationsforschung im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projektes ENavi eingesetzt.



// Analyse von globalen Innovationsaktivitäten mit dem Global Patent Explorer.

// Analysis of global innovation activities with the Global Patent Explorer.

<https://psim.shinyapps.io/patent/>

// Achievements in 2018

“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 2018, excellent results were once again achieved in the key areas.

// OECD’s Big Data Analytics challenge

Together with colleagues from the University of Aalborg/Denmark, ZSW scientists from the Systems Analysis research department developed the Global Patent Explorer tool for analysing global innovation activities. With this, they won the OECD’s first Big Data Analytics challenge in the IP Statistics for Decision Makers (IPSDM) field. The Global Patent Explorer makes it possible to visualise and geographically locate inventive activities around the globe. It is based on research work that combines traditional patent analyses with machine learning methods and so-called Natural Language Processing, for example to generate innovative quality indicators for patents. The tool is aimed at experts from the policy consulting field as well as companies and investors who can use it to identify technology development trends. The Global Patent Explorer is currently being used by ZSW scientists for technology analysis and innovation research as part of the ENavi Kopernikus project funded by the German Federal Ministry of Education and Research.



// Blick ins Innere der neuen CIGS-Inline-Beschichtungsanlage.
// View inside the new CIGS in-line coating plant.

// Schnellere Schichten für die CIGS-Dünnschicht-Photovoltaik

Auf der neuen Koverdampfungsanlage für die Beschichtung des CIGS-Absorbers im Durchlaufverfahren wurde 2018 ein stabiler Beschichtungsprozess etabliert. Durch die zusammen mit einem Industriepartner realisierte größere Flexibilität in der Prozessführung sowie eine detailliertere Prozessdatenvisualisierung konnten Solarzellen mit Wirkungsgraden von 18,4 % (ohne Antireflexschicht) realisiert werden. Diese Werte übertreffen bereits die bisher am ZSW erzielten Rekorde in diesem produktionsnahen Herstellungsverfahren, obwohl die Beschichtungsgeschwindigkeit – und damit die Wachstumsrate – sogar verdoppelt wurde. Ausgehend von den aktuell 30 Minuten Wachstumsdauer für eine komplette 2,2 µm dünne CIGS-Schicht soll die benötigte Zeit zunächst auf 5 bis 10 Minuten gesenkt und dann noch weiter reduziert werden.

// Sauber tanken – CEP-Abnahme von Wasserstofftankstellen

Wasserstofftankstellen nach der weltweit eingesetzten Norm SAE J2601 benötigen in Deutschland die Freigabe durch die Clean Energy Partnership (CEP). Hierfür müssen sie eine Reihe von Tests bestehen, für die am ZSW ein mobiles Fueling Station Test Module (FSTM) entwickelt wurde. Im Jahr 2018 wurden mit diesem Abnahmegerät vom ZSW an neun Tankstellen erfolgreich die CEP-Tests durchgeführt. Für 2019 sind bereits weitere 35 Abnahmen geplant. Die maßgeblich vom ZSW erstellte Berichtsvorlage zu den Tests wird in die künftig weltweit einheitliche Abnahmeprozedur nach ISO 19880-1 Eingang finden. Mit dem FSTM können zusätzlich Wasserstoffproben zur Qualitätssicherung entnommen und die Menge des getankten Wasserstoffs bestimmt werden. Für die Analyse der Wasserstoffproben nach internationalem Qualitätsstandard ISO 14687-2 hat das ZSW ein entsprechendes Analytiklabor eingerichtet. Es ist eines von nur drei unabhängigen Laboren in Europa, die in der Lage sind, die Einhaltung der extrem geringen Verunreinigungen nach den Vorgaben dieser ISO-Norm vollständig zu überprüfen.

// Faster coatings for CIGS thin-film photovoltaics

A stable coating process was established in 2018 in the new co-evaporation plant for coating the CIGS absorber in an in-line process. With the greater flexibility in the process control and more detailed visualisation of the process data that have been achieved together with an industrial partner, it has been possible to realise solar cells with 18.4% efficiencies (without anti-reflective coating). These values already exceed the records previously achieved at ZSW in this industrially relevant manufacturing process, even though the coating speed – and thus the growth rate – was actually doubled. Based on the current growth time of 30 minutes for a complete 2.2 µm-thin CIGS layer, it is planned to initially reduce the required time to 5 to 10 minutes and then reduce it even further.

// Clean refuelling – CEP acceptance of hydrogen filling stations

Hydrogen filling stations which meet the worldwide standard SAE J2601 require approval by the Clean Energy Partnership (CEP) in Germany. To achieve this, they must pass a series of tests for which a mobile Fueling Station Test Module (FSTM) was developed at ZSW. In 2018, the CEP tests were successfully carried out at nine filling stations using ZSW’s test module. A further 35 acceptance tests are already planned for 2019. The report template for the tests, which was mainly prepared by ZSW, will be included in a future worldwide standardised acceptance procedure according to ISO 19880-1. The FSTM also makes it possible to take additional hydrogen samples for quality assurance purposes and to determine the amount of hydrogen that is dispensed. ZSW has set up a corresponding analytical laboratory for analysing hydrogen samples according to the international quality standard ISO 14687-2. It is one of only three independent laboratories in Europe that are able to fully verify compliance with the extremely low impurity levels according to the specifications of this ISO standard.



// Test einer Wasserstofftankstelle in Potsdam mit dem ZSW-FSTM nach CEP-Vorgaben.

// Testing a hydrogen filling station in Potsdam with the ZSW-FSTM according to CEP specifications.



// ZSW-Forschungsplattform (FPL) verbindet Batterieproduktionsforschung deutschlandweit

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt QS-Zell hat das ZSW moderne Qualitätssicherungs-Maßnahmen an der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Li-Ionen-Zellen (FPL)“ entwickelt. Nach der erfolgreichen Implementierung in den Referenzprozess konnten Forschungsinstitute aus ganz Deutschland aus dem ProZell-Kompetenzcluster ihre Ergebnisse validieren und auf Serientauglichkeit prüfen. Damit kann sichergestellt werden, dass die Forschungsergebnisse in die Anwendung umsetzbar sind und zudem entlang der gesamten Prozesskette verknüpft und auf einer einheitlichen Basis – der prismatischen PHEV-1-Hardcase-Zelle – miteinander verglichen werden können. Die FPL des ZSW leistet damit als Ausgangs- und Integrationsplattform einen erheblichen Beitrag zur Bündelung der Kompetenzen der deutschen Batterieforschung.

// Deutsch-koreanische Kooperation in der Batterieforschung

Am 7. Mai startete das Korea Institute of Science and Technology (KIST) eine Kooperation mit dem ZSW. Der Fokus liegt zunächst auf der Batterieforschung, es können aber auch weitere Themen wie Brennstoffzellen und Wasserstoff einbezogen werden. Das staatliche KIST ist ein multidisziplinäres Forschungsinstitut mit Sitz in Seoul, Südkorea. Es wurde 1966 gegründet und gilt als führend in der Energieforschung.

// ZSW's FPL research platform connects battery production research throughout Germany

In the QS-Zell project funded by the German Federal Ministry of Education and Research, ZSW has developed modern quality assurance measures for the "Research Platform for Industrial Production of Large Li-ion Cells (FPL)". After successful implementation in the reference process, research institutes from all over Germany were able to validate their results from the ProZell competence cluster and test them in terms of series suitability. This ensures that the research results can be implemented in the application and can also be linked along the entire process chain and compared with one another on a uniform basis – the prismatic PHEV-1 hardcase cell. ZSW's FPL therefore makes a considerable contribution to bundling Germany's battery research expertise as an initial and integration platform.

// German-Korean collaboration on battery research

On 7 May, the Korea Institute of Science and Technology (KIST) started a collaboration with ZSW. The focus will initially be on battery research, but other topics such as fuel cells and hydrogen can also be included. The state-owned KIST is a multidisciplinary research institute based in Seoul, South Korea. It was founded in 1966 and is regarded as a leader in energy research.



// Das koreanische KIST und ZSW starteten eine Kooperation zur Entwicklung innovativer Batterien.

// Korea's KIST and ZSW have started a collaboration to develop innovative batteries.



// Einweihung des Power-to-Gas-Leuchtturmprojektes in Wyhlen durch Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut (2. v. l.).

// Inauguration of the Power-to-Gas lighthouse project in Wyhlen by Economics Minister Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut (2nd from left).

// Einweihung des Power-to-Gas-Leuchtturmprojekts

Am 15. November wurde das Leuchtturmprojekt im Beisein von Baden-Württembergs Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut offiziell in Wyhlen eingeweiht. Das ZSW koordiniert das vom Land Baden-Württemberg geförderte Vorhaben. Die Power-to-Gas-Anlage des Industriepartners kann pro Tag rund 500 Kilogramm „grünen“ Wasserstoff erzeugen. Zusätzlich erprobt das ZSW in einer angeschlossenen Forschungsanlage eigene Elektrolyseentwicklungen im 300-kW-Bereich. Zum Einsatz kommen effizientere Katalysatoren und günstigere Elektroden. Die ZSW-Forscher übernehmen das technische Monitoring der Gesamtanlage und erstellen im Rahmen des Projektes einen Technologieleitfaden für Power-to-Gas-Anlagen mit dem Ziel, Wasserstoff zukünftig noch effizienter und wirtschaftlicher produzieren zu können. Langfristiges Ziel der Forscher und Ingenieure ist es, die heutigen Produktionskosten in etwa zu halbieren. Geplant ist die Inbetriebnahme der Gesamtanlage und der Beginn der kommerziellen Wasserstoff-Produktion im März 2019.

// Inauguration of the Power-to-Gas flagship project

On 15 November, the flagship project was officially inaugurated in Wyhlen in the presence of Baden-Württemberg's Minister for Economic Affairs, Dr Nicole Hoffmeister-Kraut. ZSW is coordinating the project, which is funded by the Federal State of Baden-Württemberg. The industrial partner's power-to-gas facility can produce around 500 kilograms of "green" hydrogen per day. In addition, ZSW is testing its own electrolyser developments in the 300 kW range in a connected research facility. More efficient catalysts and cheaper electrodes are being used. The ZSW researchers are responsible for technically monitoring the entire facility and, as part of the project, are drawing up technology guidelines for power-to-gas facilities with the aim of producing hydrogen even more efficiently and economically in the future. The long-term goal of the researchers and engineers is to halve today's production costs. The plan is to commission the entire facility and start commercial hydrogen production in March 2019.



// Containerbasierte F&E-Elektrolyseeinheit an der Power-to-Gas-Anlage in Wyhlen.

// Container-based R&D electrolysis unit located at the power-to-gas facility in Wyhlen.



// Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ZSW bilden eine „Lebende Grafik“.
// ZSW employees form a “human graph”.



// Oberbürgermeister Fritz Kuhn mit Moderatorin Dr. Jana Kübel im Gespräch mit Schülern des Hans- und Sophie-Scholl-Gymnasiums.
// Mayor Fritz Kuhn with presenter Dr. Jana Kübel in a discussion with pupils of the Hans- und Sophie-Scholl-Gymnasium.



// Ministerpräsident Winfried Kretschmann.
// Baden-Württemberg's Minister President, Winfried Kretschmann.



// Schülerinnen und Schüler der it.schule diskutieren über die Energiewende.
// Pupils of the it.schule engaged in a discussion about the energy transition.



// Schülerinnen und Schüler des Philipp-Matthäus-Hahn-Gymnasiums präsentieren „die energieautarke Schule“.
// Pupils of the Philipp-Matthäus-Hahn-Gymnasium present “the energy-autonomous school”.

// 30 Jahre ZSW: Die Energie der Sonne auf die Erde holen

// 30 years of ZSW: bringing the sun's energy down to earth

Am 15. Oktober feierte das ZSW sein 30-jähriges Instituts-jubiläum mit 400 Gästen im Haus der Wirtschaft.

Den Auftakt der Veranstaltung bildete ein Empfang im Rahmen einer Ausstellung zu den sechs großen Forschungsthemen: Batterien, Wasserstoff und Brennstoffzellen, regenerative Energieträger, Photovoltaik, Systemanalysen sowie Netzintegration und Vorhersagen. Themenwände und Exponate „zum Anfassen“ lieferten den Gästen aus Politik, Forschung und Industrie viel Stoff für Gespräche mit den ZSW-Kolleginnen und -Kollegen.

Rund um Energiewende und Klimaschutz

„Nicht die Sonne dreht sich um die Erde, sondern die Erde um die Sonne, sagte einst Kopernikus. Wir sollten die Energie der Sonne nicht aus der Erde holen, sondern auf die Erde holen, sagt das ZSW.“ Mit diesen Worten eröffnete Ministerpräsident Winfried Kretschmann seine Rede, in der er das ZSW anerkennend als „unser baden-württembergisches Flaggschiff in Sachen angewandter Energieforschung, oder besser: Energiewende-Forschung“ bezeichnete. Es folgten Grußworte vom Stuttgarter Oberbürgermeister Fritz Kuhn und ein Rückblick über die Historie des Instituts durch den Kuratoriumsvorsitzenden Professor Christian Mohrdieck. Dieser bedankte sich abschließend bei Professor Werner Tillmetz, Vorstandsmitglied des ZSW und Leiter des Geschäftsbereichs Elektrochemische Energietechnologien, der zum 30. September in den Ruhestand gegangen war.

Ein Highlight der Veranstaltung war die Festrede von Mario Schmidt, Professor an der Hochschule Pforzheim und Mitglied des Beirats der Landesregierung für nachhaltige Entwicklung, unter dem Titel „Klimaschutz, Energiewende, Circular Economy: The Next Challenge“. Er zeigte die immensen Rohstoffbedarfe für den Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energiequellen auf: Ein Grund mehr, mit unseren Anstrengungen nicht nachzulassen, am ZSW energie- und materialeffiziente Technologien zu entwickeln.

Und was kommt in 30 Jahren?

Wie wird die Welt in 30 Jahren aussehen, wie unsere Mobilität und die Energieversorgung? Danach hatte das ZSW im Vorfeld der Feier Schülerinnen und Schüler aus Stuttgart und Ulm gefragt. Ihre Antworten präsentierten das Hans- und Sophie-Scholl-Gymnasium aus Ulm, das Philipp-Matthäus-Hahn-Gymnasium aus Leinfelden-Echterdingen und das Technische Gymnasium it.schule aus Stuttgart-Möhringen auf der Bühne und in der Ausstellung mit viel Engagement und Kreativität.

Lebendige Personalgrafik

Zum Abschluss der Veranstaltung hieß es „Bühne frei“ für die Kolleginnen und Kollegen des ZSW: Sie stellten sich nach dem Datum ihres Eintritts ins Institut entlang eines Zeitstrahls auf und bildeten so eine lebendige „Grafik“ der Personalentwicklung. Vorstandsmitglied Professor Michael Powalla bedankte sich bei allen für ihren Einsatz und würdigte sie als „das wichtigste Kapital“ des ZSW.

On 15 October, ZSW celebrated its 30th anniversary with 400 guests at the Haus der Wirtschaft venue.

The event kicked off with a reception surrounded by an exhibition on the six main research topics: batteries, hydrogen and fuel cells, renewable energy carriers, photovoltaics, systems analysis as well as grid integration and forecasts. Wall presentations and hands-on exhibits provided plenty of inspiration for discussions between guests from politics, research and industry and ZSW colleagues.

Everything about the energy transition and climate protection

“As Copernicus once said, ‘The Sun does not revolve around the Earth, the Earth revolves around the Sun’. We should not be taking the Sun’s energy from the Earth, but rather bringing it down to Earth instead, as ZSW frames it.” With these words, Baden-Württemberg Minister President Winfried Kretschmann opened his speech in which he acknowledged ZSW as “the flagship of Baden-Württemberg in terms of applied energy research, or rather: energy transition research”. This was followed by greetings from the Mayor of Stuttgart, Fritz Kuhn, and a review of the history of the institute by the Chairman of the Board of Trustees, Professor Christian Mohrdieck. At the end of his speech, he thanked Professor Werner Tillmetz, Member of the Board at ZSW and Head of the Electrochemical Energy Technologies Division, who retired on 30 September.

A highlight of the event was the talk held by Mario Schmidt, professor at the Hochschule Pforzheim and member of the Advisory Board of the Federal State Government for Sustainable Development, entitled “Climate Protection, Energy Transition, Circular Economy: The Next Challenge“. He pointed out the tremendous raw material requirements necessary to transition from fossil to renewable energy sources: one more reason not to let up in our efforts to develop energy- and material-efficient technologies at ZSW.

And what will happen in the next 30 years?

What will the world look like in 30 years? What will our mobility and energy supply be like? In the run-up to the celebration, ZSW asked pupils from Stuttgart and Ulm for their views on this. Pupils from Hans- und Sophie-Scholl-Gymnasium Ulm, Philipp-Matthäus-Hahn-Gymnasium Leinfelden-Echterdingen and Technisches Gymnasium it.schule Stuttgart-Möhringen presented their ideas, on stage and as part of the exhibition, with a lot of dedication and creativity.

A personnel development graph, formed by ZSW employees

At the end of the event, the stage was cleared for our ZSW employees: organised by the year in which they joined the institute, they positioned themselves along a time line and formed a human graph of personnel development. Board member Professor Michael Powalla thanked everyone for their dedication and for being ZSW’s most important “resource”.



// Schwerpunktbericht

Wege zur klimaneutralen Mobilität.

// Focus Report

On the way towards climate-neutral mobility.

// Wege zur klimaneutralen Mobilität

// On the way towards climate-neutral mobility



Deutschland hat sich mit dem Energiekonzept und dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung Ziele gesetzt, die langfristig die Einhaltung der Verpflichtungen aus dem Klimaabkommen von Paris sicherstellen sollen. Der Klimaschutzplan definiert dabei auch sektorspezifische Treibhausgasminderungen bis zum Jahr 2030. Besonders anspruchsvoll ist die Zielsetzung für den Verkehr. Hier soll bis zum Jahr 2030 eine Reduktion erreicht werden, die von heute aus gesehen etwa 40 % entspricht – bei weiter steigender Verkehrsleistung im Personen- und Güterverkehr.

The federal government set goals for Germany for 2050 through the energy concept and climate protection plan, aimed at ensuring compliance with the obligations of the Paris climate agreement in the long term. The climate protection plan also defines sector-specific greenhouse gas reductions in this regard up to the year 2030. Targets for transport are particularly ambitious. The aim in this respect is to achieve a reduction by 2030 of around 40% by today's metrics – in the face of further increases in traffic figures for passenger and freight transport.



Die Transformation des Stromsystems hin zu erneuerbaren Energien im Verkehr

Klimaschutzziele im Verkehr können über drei Ansätze adressiert werden: Verkehr vermeiden, Verkehr auf klimafreundliche Verkehrsträger verlagern und Verkehr verbessern im Sinne einer technischen Optimierung und der Einführung neuer Technologien. Dies kann sowohl auf der Antriebsseite (Elektrifizierung des Antriebsstrangs) als auch auf der Treibstoffseite, insbesondere durch den Einsatz von regenerativem Strom und strombasierten gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen, erfolgen. Die konsequente Fortsetzung der Transformation des Stromsystems hin zu den Erneuerbaren ist somit eine Grundvoraussetzung für eine klimafreundliche Mobilität. Umgekehrt müssen aber auch alle Zukunftsoptionen der Mobilität berücksichtigt werden. So kann der Ausbau der Übertragungsnetze langfristig tendenziell geringer ausfallen, wenn Offshore-Windenergieanlagen vor Ort Wasserstoff für die Mobilität erzeugen. Auch die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge in Kombination mit dezentralen Photovoltaikanlagen kann dazu beitragen, den andernfalls notwendigen Ausbau stationärer Speicherlösungen zu reduzieren und somit die optimale Gestaltung eines vollständig integrierten Energiesystems der Zukunft unterstützen.

Deutschland drohen Strafzahlungen gemäß Effort-Sharing-Regulation der EU

Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, Verkehrsverlagerung und Verkehrsverbesserung sind seit Langem bekannt. Aktuelle Referenzszenarien gehen aber nicht davon aus, dass mit der bestehenden Maßnahmenintensität das Klimaschutzziel für 2030 erreicht werden kann. Daher werden zusätzliche und stärkere Interventionen ebenso erforderlich sein wie technologische Weiterentwicklungen und deren rasche Diffusion im jeweiligen Anwendungsspektrum.

Dies gilt nicht nur vor dem Hintergrund des Pariser Klimaabkommens und des Klimaschutzplans der Bundesregierung. Denn aufgrund der Effort-Sharing-Regulation der EU ist Deutschland verpflichtet, in denjenigen Sektoren, die nicht dem europäischen Emissionshandelssystem unterliegen – in erster Linie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft –, die Treibhausgasemissionen um 38 % gegenüber 2005 zu reduzieren. Es muss deshalb zeitnah ein umfassendes und wirksames Maßnahmenpaket umgesetzt werden, da Deutschland im Falle einer Zielverfehlung erhebliche Strafzahlungen drohen.

Transformation of the power system to accommodate renewable energy in the transport sector

Climate protection objectives in the transport sector can be addressed from three angles: reduce the amount of traffic, employ more climate-friendly modes of transport and implement technological improvements, such as optimisation schemes, new drive systems (electrification of power trains) and new fuel technologies. The latter mostly involves the use of regenerative electricity and electricity-based gaseous and liquid fuels. Continuing systematic efforts to transform the power system towards renewable energies is consequently a fundamental prerequisite for climate-friendly mobility. By the same token, however, all future options around mobility must be squarely on the table. In the long term, transmission grids may require less expansion if, for instance, offshore wind turbines are used to locally generate hydrogen for mobility. Also, the use of battery-electric vehicles in combination with decentralised photovoltaic systems may contribute towards reducing the demand for stationary storage solutions and thus support the optimal design of a completely integrated futuristic energy system.

Germany is facing financial penalties according to the EU's Effort-Sharing Regulation

Measures to prevent, transform and improve emissions in the transport sector have long been established. Current referencing scenarios, however, do not predict that the climate protection objectives for 2030 can be met at the current intensity of efforts. For this reason, further and more forceful interventions are just as necessary as technological advancements and their rapid spread in applications.

The climate goals are not just set in the Paris climate agreement and the German Federal Government's climate protection plan, but also in the EU's Effort-Sharing Regulation, which obligates Germany to reduce greenhouse gas emissions by 38% from 2005 values in those sectors not subject to the European Union Emissions Trading Scheme. These are chiefly the transport, buildings and agricultural sectors. The prompt implementation of a comprehensive and effective package of measures is therefore necessary in order for Germany to avoid considerable financial penalties if targets are missed.



// Focus



Schärfere CO₂-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bis 2030

Darüber hinaus hat die EU weitere Maßnahmen ergriffen: So haben sich EU-Parlament und -Rat im Dezember 2018 auf CO₂-Flottengrenzwerte für die Hersteller von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen für den Zeitraum von 2021 bis 2030 geeinigt (analog sind Standards für schwere Lkw und Busse vorgesehen). Danach sollen die CO₂-Emissionen der EU-Neuwagenflotte bis 2030 gegenüber 2021 um 37,5 % auf einen Wert von etwa 71 g CO₂/km gesenkt werden, was einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 3,0 Liter pro 100 km entspricht. Für leichte Nutzfahrzeuge wurde für den gleichen Zeitraum eine CO₂-Reduktion um 31 % festgelegt. Ohne erhebliche technische Weiterentwicklungen und eine deutliche Beschleunigung der Diffusion elektrischer Antriebe werden die Vorgaben nicht einzuhalten sein. Sie reichen allein auch nicht aus, um das Klimaschutzziel für 2030 zu erfüllen. Dafür sind die Grenzwerte nicht ambitioniert genug und außerdem können sich die Technologien nur über das Neufahrzeugsegment etablieren, denn eine Umrüstung des Fahrzeugbestands ist nicht möglich. Und aufgrund typischer Fahrzeughaltedauern von 10 bis 15 Jahren diffundieren neue Konzepte nur langsam, selbst wenn sie große Teile oder das gesamte Spektrum der Neuzulassungen umfassen.

Ökostrombasierte Kraftstoffe als No-regret-Strategie

Angesichts dieser Gesamtsituation stellt sich die Frage, welche weiteren technischen Optionen infrage kommen, zu welchem Zeitpunkt sie zur Verfügung stehen (müssen) und welchen Beitrag sie jeweils leisten können. Während die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms aus einer Batterie oder bei Lkw oder Bussen aus einer Oberleitung energetisch gesehen die beste Lösung darstellt, wird in Brennstoffzellenkonzepten ebenfalls der Effizienzvorteil des elektrischen Antriebs genutzt. Hier entstehen jedoch gegenüber der direkten Stromnutzung Umwandlungsverluste bei der Wasserstoffherstellung und -rückverstromung.

Daneben ist der Einsatz von strombasierten gasförmigen oder flüssigen regenerativkraftstoffen in Verbrennungsmotoren zu diskutieren, selbst wenn hierdurch keine Effizienzfortschritte in der Fahrzeugtechnologie erzielt werden können und somit vollständig auf die Treibhausgasreduktionswirkung der erneuerbaren Energien gesetzt werden muss. Die Umwandlungsverluste bei der Kraftstoffproduktion lassen diese synthetischen Kraftstoffe gegenüber elektrischen Antrieben nur als zweitbeste Option erscheinen, angesichts der kurzen verbleibenden Zeit für das Erreichen der Klimaschutzziele ist ihre vorübergehende Nutzung jedoch für den Fahrzeugbestand von Pkw und Lkw analog zu

More stringent CO₂ fleet limits for passenger vehicles and light commercial vehicles by 2030

The EU has taken further steps: in December 2018, for instance, the European Parliament and Council agreed to CO₂ fleet limits for manufacturers of passenger vehicles and light commercial vehicles for the period 2021 to 2030 (standards are similarly envisaged for HGVs and buses). This aims to reduce the CO₂ emissions of new vehicles within the EU by 37.5% from 2021 values to approx. 71g CO₂/km in 2030, equivalent to an average fuel consumption of 3.0 litres per 100 km. For light commercial vehicles, a CO₂ reduction of 31% has been defined for the same period. Meeting these targets will not be possible without considerable technical advancements and rapid acceleration of the spread of electric drive systems. And even if they are met, the climate protection objective for 2030 will still fail. The CO₂ limits are not ambitious enough and, additionally, the technologies can only be established via the new vehicles segment, since converting existing vehicles is not an option. With vehicles typically in use for 10 to 15 years, the time required for new concepts to gain market traction is therefore lengthy, even if large parts of or even the entire spectrum of new registrations is included.

Fuels based on green electricity as a “no regret” strategy

In view of this overall situation, it is necessary to assess all of the other technical options, the timeframes in which these will/must be available and the contribution each is likely to make. While the direct use of renewable electricity from a battery or, in the case of trucks or buses from overhead wiring, would seem to represent the best solution from an energy efficiency perspective, fuel cell concepts also draw on the efficiency advantages of an electric drive. However, conversion losses are involved in the production of hydrogen and its conversion back into power, making this less attractive than direct electricity use.

It is also worth discussing the use of electricity-based gaseous and liquid regenerative fuels in combustion engines, even with little prospect of achieving efficiency advances in vehicle technology. This means that, we can focus fully on the impact of renewable energies on greenhouse gas emissions. These synthetic fuels would seem to be an option of “secondary importance” behind electric drives due to conversion losses in fuel production. However, given the short time remaining to meet climate change targets, it is worth considering their temporary use along similar lines as biofuels for passenger cars and trucks.

Biokraftstoffen in Betracht zu ziehen. Zudem bestehen Anwendungsbereiche, für die sich auch langfristig noch keine sinnvollen Alternativen zu Verbrennungsmotoren mit kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen abzeichnen. Zu nennen sind der Flugverkehr, der internationale Schiffsverkehr sowie Teile des Schwerlastverkehrs auf der Straße oder Teile des Eisenbahnverkehrs. Das bedeutet auch, dass der schnelle und weltweite Auf- und Ausbau von Produktionsstätten für strombasierte regenerativkraftstoffe eine No-regret-Strategie darstellt.

Die Bewertungskriterien nachhaltiger Alternativen im Verkehr

Der Klimaschutz ist zwar ein sehr wichtiges, jedoch nicht das einzige Kriterium, nach dem sich die Ausgestaltung der Mobilität der Zukunft richten muss. Neben weiteren ökologischen Aspekten wie Luftreinhaltung und Lärm, die auch im direkten Zusammenhang mit der menschlichen Gesundheit stehen, sind ökonomische und soziale Komponenten zu beachten. Die Bewertung nachhaltiger Alternativen im Verkehrssektor ist somit mehrdimensional und komplex. Eine einfache Antwort gibt es nicht.

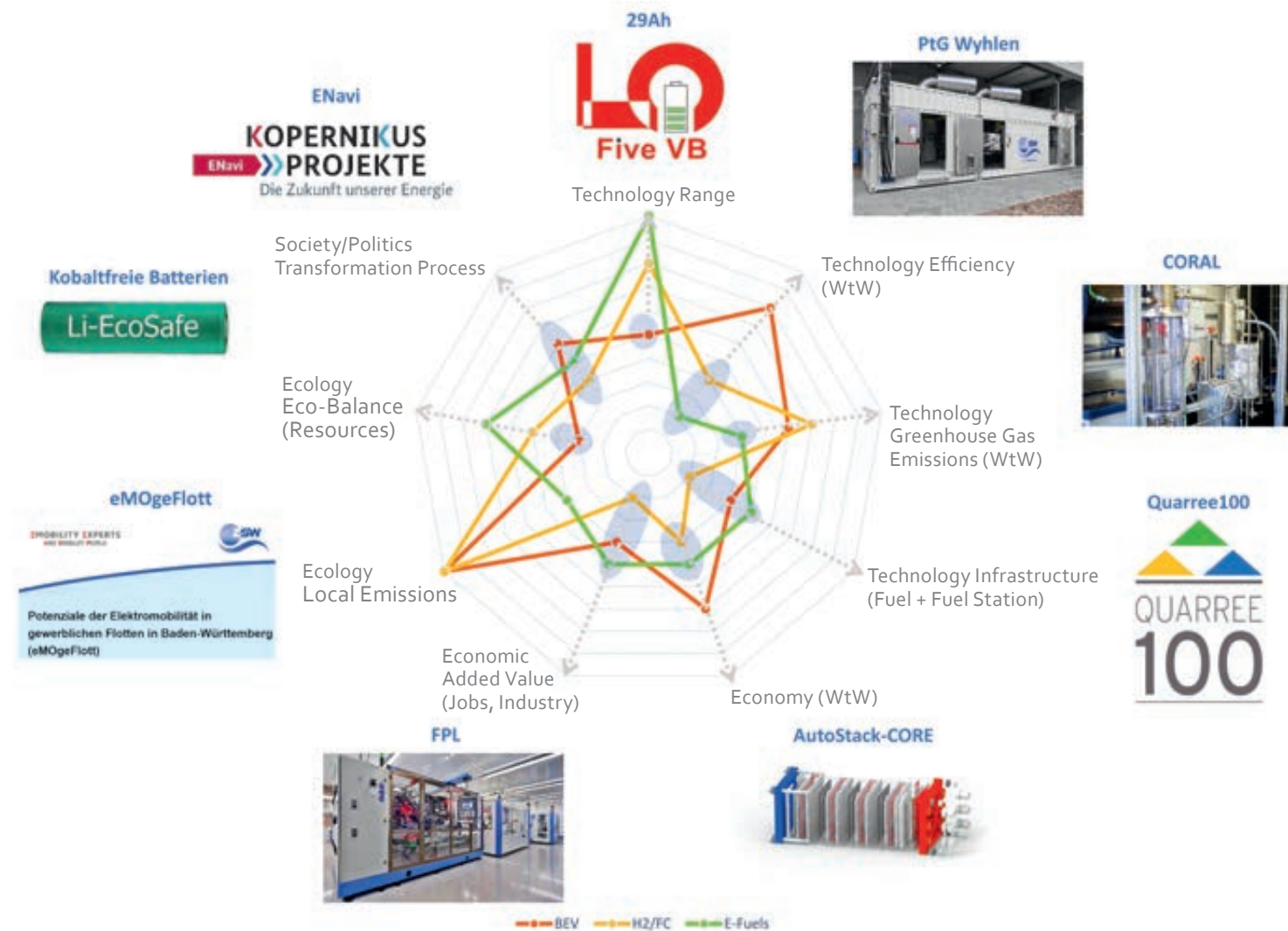
Nicht zuletzt aus diesem Grund ist das ZSW im Themenfeld Mobilität der Zukunft sehr breit aufgestellt und unterstützt mit seinen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten robuste Optionen, ohne sich auf einen bestimmten Pfad festzulegen. In der Abbildung auf Seite 22 sind ausgewählte Kriterien aufgeführt, die heute für die Bewertung der Einzeltechnologien herangezogen werden. Im Bereich der Technikbewertung sind dies etwa die Energieeffizienz in der Well-to-Wheel Betrachtung von der Energiegewinnung bis zur tatsächlichen Fortbewegung, die Reichweite der Fahrzeuge oder das Vorhandensein von Infrastrukturen (Kraftstofferzeugung und Tankstellen). Für die ökologische Bewertung stellen die Treibhausgasemissionen, die lokalen Emissionen und der Ressourcenbedarf die wesentlichen Schwerpunkte dar, während in der ökonomischen Dimension einerseits die Kostenseite der Well-to-Wheel-Betrachtung im Vordergrund steht, andererseits aber auch sehr intensiv über Fragen der Wertschöpfung, Arbeitsplätze und einen möglichen Wandel von Industriestrukturen nachgedacht wird. Hier muss der Bewertungsrahmen auch um weitere gesellschaftspolitische Aspekte erweitert werden, die es ermöglichen, Transformationsprozesse ganzheitlich zu betrachten. Das ZSW arbeitet in allen Dimensionen daran, durch technologische und konzeptionelle Weiterentwicklungen einen Beitrag zum Erfolg der Energie- und Verkehrswende zu leisten und damit die jeweilige Bewertung zu verbessern. Zu den dringlichsten Entwicklungsaufgaben zählt dabei die Beseitigung der sog. „bottlenecks“ (in der Abbildung auf Seite 22 grau hinterlegt).

Application areas also exist where no meaningful alternatives at all to combustion engines powered by carbon-containing fuels are apparent, even in the long term. Examples include air traffic, international shipping, heavy freight traffic on roads, to some degree, and parts of rail transport. This also means that the rapid and worldwide construction and expansion of production facilities for electricity-based regenerative fuels represents a “no regret” strategy.

Assessment criteria for sustainable alternatives in transport

Climate protection is certainly a very important criterion in steering the future of mobility, although not the only one. Alongside further green considerations such as prevention of air pollution and noise, which also have a direct bearing on human health, economic and social components warrant attention. Assessing sustainable alternatives in the transport sector is therefore complex and multidimensional. There is no simple answer.

Mainly for this reason, ZSW is very broadly positioned when it comes to future mobility and supports robust options through its research and development work, without having to commit to a singular path. Selected criteria now used to assess individual technologies are presented in the figure on page 22. In terms of technical assessment, these include energy efficiency in the well-to-wheel evaluation from energy generation to effective motion, the range of vehicles and the presence of infrastructures (fuel production and fuel stations). For ecological assessment, the key focus is on greenhouse gas emissions, local emissions and resource requirements, while the economic side looks at the cost aspects of the well-to-wheel evaluation while also focussing intently on issues like added value, jobs and potential changes to industrial structures. This necessitates extending the assessment framework to include additional socio-political aspects and allow transformation processes to be holistically observed. ZSW is working at every level to contribute to the success of efforts towards the transformation of energy and transport and, consequently, to improve relevant assessments through technological and conceptual advancements. Eliminating bottlenecks is among the most pressing development tasks (highlighted in grey in the figure on page 22).



// Kriterienauswahl zur Bewertung der Einzeltechnologien hinsichtlich technologischer, ökonomischer und ökologischer sowie gesellschaftspolitischer Aspekte.

// Selection criteria for assessing individual technologies with respect to technological, economic, ecological and socio-political aspects.

Die folgenden ausgewählten ZSW-Projekte veranschaulichen die Arbeiten der ZSW-Wissenschaftler an den sogenannten „bottlenecks“, von der Erschließung von Verbesserungspotenzialen im technologischen Bereich über die ökonomische und ökologische Bewertung bis hin zum notwendigen gesellschaftlichen Transformationsprozess.

The following selected ZSW projects illustrate how ZSW scientists work to resolve bottlenecks, from exploiting development potential in the area of technology and assessing economic and ecological aspects through to the necessary social transformation process.

Die Technologien für eine nachhaltige Mobilität

Technologies for sustainable mobility

Voraussetzung für eine nachhaltige Mobilität sind klimaneutrale Energietechnologien, die sich erfolgreich am Markt etablieren können. Um hierfür die Grundbedingungen zu schaffen, arbeitet das ZSW in den folgenden beispielhaften Projekten an der weiteren technischen Verbesserung. Diese haben u. a. das Ziel, die Energiedichte von Batterien zu erhöhen oder die Energieeffizienz bei der Herstellung von Wasserstoff und strombasierten synthetischen Kraftstoffen zu steigern.

The prerequisites for sustainable mobility are climate-neutral energy technologies that can be successfully established in the market. To lay the necessary groundwork in this respect, ZSW is working to further improve components along technical lines in the following example projects. One aim is to increase the energy density of batteries and to boost energy efficiency in the production of hydrogen and electricity-based synthetic fuels.

HÖHERE REICHWEITE FÜR BATTERIEELEKTRISCHE FAHRZEUGE. Das FiveVB-Projekt 29Ah

Mit der stetig wachsenden Akzeptanz der Elektromobilität wächst auch die Anzahl von Plug-in-Hybrid- und Elektrofahrzeugen auf den Straßen. Die vollständige Marktdurchdringung wird aber nur mit leistungsfähigen, wegweisenden Innovationen bei der Zell- und Batterietechnologie gelingen. In den nächsten Jahren werden Verbesserungen bei zentralen Parametern wie Energie, Kosten, Lebensdauer und Sicherheit erwartet. Beispielsweise weisen Speichersysteme mit siliziumbasierten Anoden und Ni-reichen $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ -Kathoden eine weitaus höhere Kapazität auf und ermöglichen so Batterien mit höherer Energie.

In dem von der EU geförderten Projekt „FiveVB“ ist es dem ZSW gelungen, leistungsstarke Anoden aus Si-Legierung und $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ -Kathoden zu entwickeln – vom Labormaßstab bis hin zum industriellen Maßstab. Zunächst wurden die neuen chemischen Zellstrukturen in gestapelten Pouch-Zellen mit 1,4 Ah demonstriert. Durch die Optimierung der Mikrostruktur der Elektroden, der Beladung und des Zellausgleichs konnten Zellen mit guter Zyklenfestigkeit, hervorragendem Leistungsverhalten und einer bemerkenswerten spezifischen Energie und Energiedichte, die 21% bzw. 15% über dem Stand der Technik von Graphit-/ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ -Zellen liegen, hergestellt werden. Schließlich gelang es mit der Produktionsforschungsanlage des ZSW in einem ersten Versuch, die neu entwickelten Elektroden in Zellen zu integrieren, die typischerweise bei Automobilanwendungen zum Einsatz kommen. Die prismatischen Hardcase-PHEV-1-Zellen liefern 29 Ah und 187 Wh/kg.

GREATER RANGE FOR BATTERY-ELECTRIC VEHICLES. The FiveVB project 29Ah

The acceptance of electromobility by the consumer is steadily increasing and so the number of plug-in hybrid and full electric vehicles on the road. However, full market penetration will only be achieved with further breakthrough innovations concerning cell and battery technologies. Key parameters such as energy, costs, durability and safety are all expected to be improved in the coming years. Silicon-based anodes and Ni-rich $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ cathodes show much higher capacities than state-of-the-art ones, thus allowing for batteries with higher energy.

Within the scope of the “FiveVB” project, sponsored by the EU, ZSW has succeeded in developing high performance Si-alloy anodes and $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ cathodes all the way from lab scale up to an industrial relevant environment. First, the new cell chemistries were validated in multi-layer stacked soft pouch cells of 1.4 Ah. The optimisation of the electrode microstructure, loading and cell balancing allowed manufacturing cells with good cycling stability, excellent power performance and a remarkable +21% specific energy and +15% energy density in comparison to state-of-the-art Graphite/ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ cells. Finally, making use of the ZSW production research facilities, we successfully demonstrated a first attempt to integrate the newly developed electrodes in standard automotive cells. Our prismatic hard case PHEV-1 cells deliver 29 Ah and 187 Wh/kg.

// Am ZSW hergestellte prismatische PHEV-1-Zellen (29 Ah).
// Prismatic PHEV-1 cells (29 Ah) produced at ZSW.



GRÜNER WASSERSTOFF SOLL WETTBEWERBSFÄHIG WERDEN. Das Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg

Ökostrombasierter Wasserstoff ist die Voraussetzung für eine CO₂-freie Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen und gleichzeitig die Basis für die Herstellung von E-Fuels. Hocheffiziente Elektrolyseure sind essenziell für die Verbesserung der Well-to-Wheel-Wirkungsgrade beim Einsatz strombasierter Kraftstoffe.

Im Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg, das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg gefördert und vom ZSW koordiniert wird, untersuchen die Wissenschaftler, wie Wasserstoff zukünftig effizienter produziert werden kann. Hierfür wurde am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein ein kommerzieller 1-MW-Elektrolyseur mit angebundener Forschungsplattform errichtet. Ein eigens hierfür entwickeltes Monitoringsystem vermisst den industriellen Anlagenteil fortlaufend über den gesamten Projektzeitraum. Darauf aufbauend erstellen die ZSW-Forscher einen Technologieleitfaden, der Verbesserungspotenziale in der Elektrolyse aufzeigt. In der angeschlossenen Forschungsplattform testet das ZSW in Reallaborumgebung einen eigenen Elektrolyseur mit neuen Komponenten. Zum Einsatz kommen etwa günstigere Elektroden und effizientere Katalysatoren, um den Elektrolysewirkungsgrad auf bis zu 85 % zu steigern. Der erzeugte Wasserstoff wird vor Ort in Trailer vertankt und kann so beispielsweise Tankstellen mit regenerativem Wasserstoff versorgen. Der Standort bietet zudem die Möglichkeit, die Abwärme aus der Elektrolyse und den Nebenaggregaten (z. B. Verdichter) künftig in einem nahegelegenen Wohngebiet zu nutzen; so lässt sich der Gesamt-Stromnutzungsgrad der Anlage noch weiter auf bis zu über 90 % steigern.

GREEN HYDROGEN TO BECOME COMPETITIVE. Flagship project: Power-to-Gas Baden-Württemberg

Hydrogen based on green electricity is the prerequisite for the CO₂-free supply of fuel cell vehicles, while at the same time the basis for manufacturing e-fuels. Highly efficient electrolyzers are essential to improving levels of well-to-wheel efficiency in the use of electricity-based fuels.

In the 'Power-to-Gas Baden-Württemberg' flagship project, which is supported by the Baden-Württemberg Ministry for Economic Affairs and is coordinated by ZSW, scientists are investigating how hydrogen can be produced more efficiently in future. This has included constructing a commercial 1 MW electrolyser with connected research platform at the Wyhlen hydropower plant on the Upper Rhine. A monitoring system developed specifically for this project measures the industrial plant section continuously throughout the full project period. Based on the results, ZSW researchers are drawing up technology guidelines illustrating potential for improvement in electrolysis. In the connected research platform, ZSW is testing its own electrolyser in a real laboratory environment with new components. For instance, more cost-effective electrodes and more efficient catalysts are used to boost the electrolysis efficiency level to up to 85%. The hydrogen produced is stored locally in trailers and is thus able to supply fuel stations, for example, with renewable hydrogen. The location also offers the future option of using the waste heat produced by electrolysis and auxiliary equipment (such as compressors) in a neighbouring residential area. This would allow the overall efficiency of power utilisation at the plant to further rise in excess of 90%.

CO₂ AUS DER LUFT ALS ROHSTOFF FÜR E-FUELS. Das Projekt CORAL

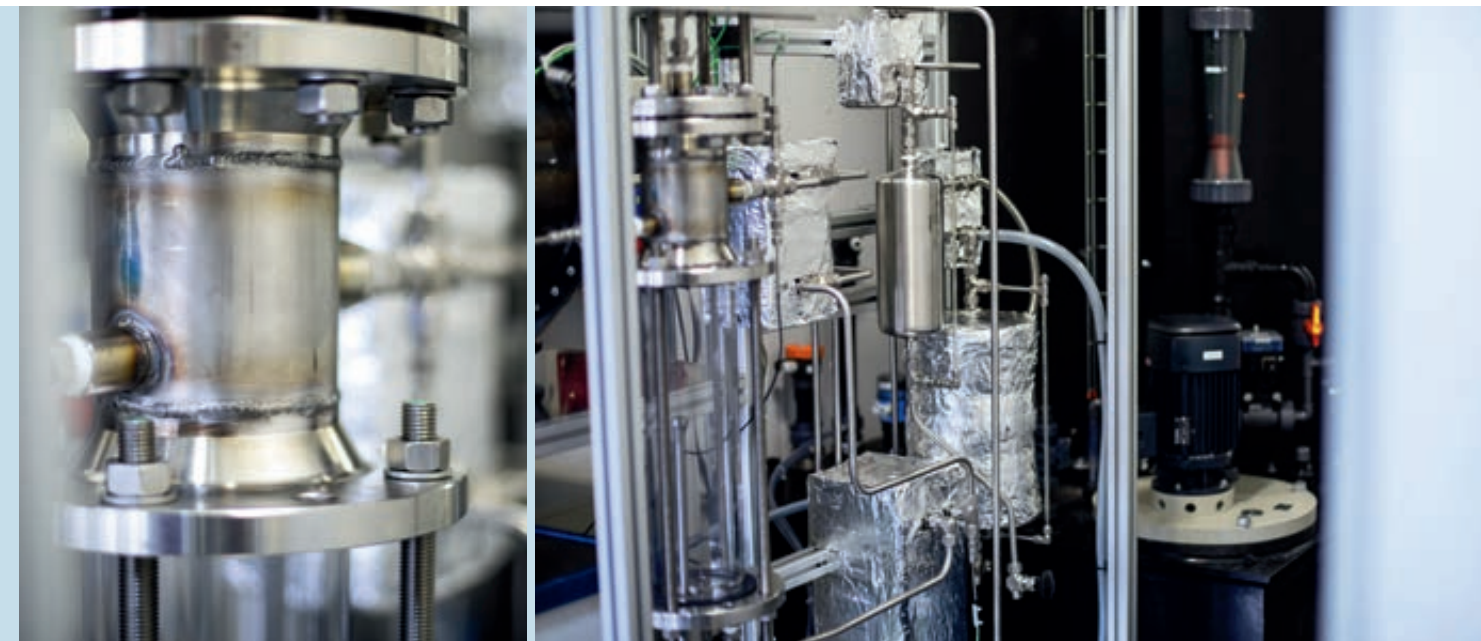
Die Erzeugung von E-Fuels besteht im Wesentlichen aus den Prozessschritten der Wasserstofferzeugung und einer nachfolgenden Kohlenwasserstoffsynthese. Als erneuerbare Kohlenstoffquelle kann dazu CO₂ aus der Luft eingesetzt werden, um auf diese Weise unabhängig von einer lokalen (meist fossilen) Kohlenstoffquelle nahezu beliebige Mengen E-Fuels klimaneutral herstellen zu können. Die gängigen Verfahren sind jedoch mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden. Im vom BMBF geförderten Projekt CORAL wird deshalb ein neues Verfahren entwickelt, bei dem der Energieaufwand zur CO₂-Bereitstellung nicht mehr allein aus hochwertigem elektrischem Strom, sondern hauptsächlich aus Abwärmen der Elektrolyse und Synthese gedeckt werden kann. Verwendet wird ein Waschprozess mit einer wässrigen Polyethylenimin-Lösung und anschließender thermischer CO₂-Desorption. Zur Ermittlung der charakteristischen Verfahrensparameter und der weiteren Entwicklung wird derzeit eine Versuchsanlage am ZSW aufgebaut.

CO₂ FROM AIR AS A RAW MATERIAL FOR E-FUELS. The CORAL project

Producing e-fuels essentially involves the processing steps of hydrogen generation and subsequent hydrocarbon synthesis. CO₂ from the air can be used in this process as a renewable carbon source to facilitate the production of just about any volume of e-fuel in a climate-neutral process, irrespective of any local (usually fossil) carbon source. Established procedures, however, are associated with a considerable energy cost. The CORAL project funded by the BMBF is therefore developing a new procedure in which energy requirements for providing CO₂ are no longer covered solely by high-cost electrical power but primarily by waste heat produced by electrolysis and synthesis. A washing process is used with an aqueous polyethylenimine solution and subsequent thermal CO₂ desorption. A pilot plant is currently being built at ZSW to determine the characteristic process parameters and provide an experimental platform for further development.



// Forschungsplattform (links) und Elektrolyseblock (rechts) des ZSW an der Power-to-Gas Anlage in Wyhlen.
// ZSW Research platform (left) and electrolysis block (right) at the Power-to-Gas plant in Wyhlen.



// 1min-Wäscher zur CO₂-Adsorption aus der Luft.
// Imine washer for CO₂ adsorption from the air.

Transformationsprozesse stehen im engen Zusammenhang zu den dafür benötigten Infrastrukturen. Können bestehende Infrastrukturen unverändert weitergenutzt werden, ist eine Umstellung in der Regel schnell zu vollziehen. Sind neue Infrastrukturen erforderlich, müssen diese zunächst entwickelt und verbreitet werden. Robustheit und Zuverlässigkeit stehen hier für die Nutzer im Vordergrund, wenn Entscheidungen für oder gegen neue Technologien getroffen werden.

Transformation processes are closely tied to the infrastructures they require. If the continued use of infrastructures is possible without change, conversion is usually quick. If new infrastructures are required, these first need to be developed and rolled out. When it comes to making a decision for or against new technologies, robustness and reliability are key factors where users are concerned.

INFRASTRUKTUREN FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT. Die energieeffiziente Stadt im QUARREE100

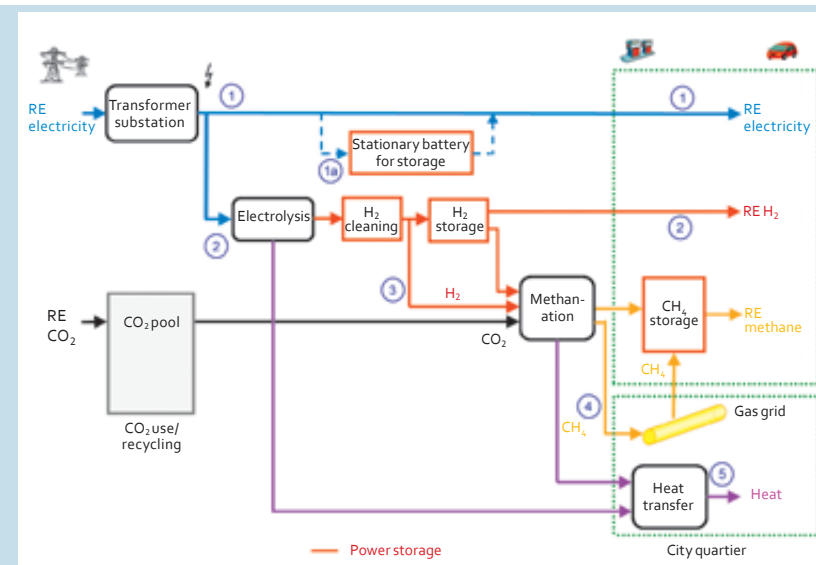
Im Zentrum des vom BMBF geförderten Projektes steht der nachhaltige Umbau des bestehenden Stadtviertels „Rüsdorfer Kamp“ der Stadt Heide in Schleswig-Holstein zur „energieeffizienten Stadt“. Ziel ist die möglichst vollständige Verwertung erneuerbarer Energien, insbesondere aus den benachbarten Windparks. Das Modell soll bundesweit auf andere Städte und Regionen übertragbar sein. Für den öffentlichen und Individual-Verkehr entwickelt das ZSW das Konzept der „Tankstelle der Zukunft“, das im Rüsdorfer Kamp demonstriert werden soll. Das Tankstellenkonzept basiert auf regenerativ erzeugtem Strom, der in drei unterschiedlichen Formen für den Verkehr bereitgestellt wird: als elektrische Energie für Elektrofahrzeuge, als Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge und in Form von Methan für den Erdgasantrieb.

Das Energiewandlungskonzept „Elektrische Energie – Wasserstoff – Methan“ wird kaskadiert genutzt, d. h. nur dann, wenn elektrische Energie nicht weiter gespeichert werden kann, wird Wasserstoff erzeugt. Methan wird nur produziert, wenn der Wasserstoffspeicher voll ist. Für dieses Projekt entwickelt das ZSW gezielt einen Elektrolyseblock mit geringerem spezifischem Energieverbrauch. Für die Methanisierung wird ein neuartiges Reaktor-konzept aufgebaut sowie ein angepasstes Gasreinigungs- und Zwischenspeicherkonzept für den Wasserstoff entwickelt.

INFRASTRUCTURES FOR SUSTAINABLE MOBILITY. Energy-efficient city in QUARREE100

The BMBF-funded project centres around sustainably converting the existing “Rüsdorfer Kamp” quarter of Heide in the German Federal State of Schleswig-Holstein into an “energy-efficient city”. The aim is to use only renewable energies to the extent possible, in particular from neighbouring wind farms. The model is expected to be transferable to other cities and regions across Germany. For public and individual transport, ZSW is developing the “Fuel station of the future” concept, which it plans to demonstrate in Rüsdorfer Kamp. The fuel station concept is based on regeneratively generated electricity being supplied for transport in three different forms: as electrical energy for electric vehicles, as hydrogen for fuel cell vehicles and in the form of methane for natural gas engines.

The “electrical energy – hydrogen – methane” energy conversion concept follows a cascaded utilisation approach, i.e. hydrogen is generated only when electrical energy cannot be stored further. Methane is produced only when the hydrogen storage limit is reached. The project involves the targeted development by ZSW of an electrolysis block with reduced specific energy consumption. For methanation, an innovative reactor concept is being built, and an adapted gas purification and intermediate storage concept is also being developed for hydrogen.



// Das ZSW-Konzept „Tankstelle der Zukunft“ liefert kaskadiert Strom, Wasserstoff sowie das Erdgassubstitut Methan aus regenerativen Quellen.
// The ZSW “Fuel station of the future” concept delivers electricity, hydrogen and natural gas substitute methane from renewable sources based on a cascaded model.

Nachhaltige Schlüsseltechnologien zur industriellen Reife führen Guiding sustainable key technologies through to industrial maturity

Neben der technischen Optimierung sind ökonomische Kriterien in der Regel entscheidend für den Einsatz neuer Technologien. Aus diesem Grund wird in den folgenden Projekten explizit an der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei der Entwicklung von Komponenten gearbeitet.

Alongside technical optimisation, economic criteria are also usually decisive when it comes to the implementation of new technologies. The following projects therefore look specifically at improving economic efficiency when developing components, whether in terms of bringing down specific costs or making use of indirect cost savings options in the course of industrialisation.

DIE AUTO-BRENNSTOFFZELLE GEHT IN SERIE. Die Projekte AutoStack-CORE und AutoStack-Industrie

Die Brennstoffzellen-Technologie hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht, dennoch steckt die notwendige Industrialisierung noch in einem sehr frühen Stadium. In Europa fehlen bislang wettbewerbsfähige Brennstoffzellen-Stacks für Automobilanwendungen. Nur wenige europäische Hersteller können ausgereifte, hochmoderne Komponenten mit den gewünschten Spezifikationen liefern. Mit dem vom ZSW koordinierten europäischen Projektverbund „AutoStack-CORE“ konnte 2017 erfolgreich eine Hochleistungsbrennstoffzelle mit einer Leistungsdichte von mehr als 4 kWl^{-1} bei Spitzenlast demonstriert werden, die in den Motorraum eines Pkw passt. Aufbauend auf diesem Funktionsmuster soll jetzt mit dem vom Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur geförderten Vorhaben „AutoStack-Industrie“ bis 2021 die Basis zur Industrialisierung geschaffen werden. Der Verbund von zehn Unternehmen der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie und dem ZSW will Brennstoffzellen zur industriellen Reife bringen. Hierbei geht es darum, Prozesse und Verfahren zur Serienfertigung zu entwickeln. Im Fokus der ZSW-Wissenschaftler stehen die Entwicklung von Brennstoffzellen-Komponenten sowie einheitlicher Testprotokolle und Prüfverfahren.

AUTOMOTIVE FUEL CELLS ENTER SERIES PRODUCTION. The AutoStack-CORE and AutoStack-Industrie projects

Fuel cell technology has come along in leaps and bounds in recent years, although the necessary industrialisation remains at a very early stage. In Europe, competitive fuel cell stacks for automotive applications have been lacking up to now. Only a handful of European manufacturers are able to supply technically mature, ultra-modern components with the required specifications. In 2017, the European “AutoStack-CORE” project group coordinated by ZSW was able to successfully demonstrate a high-performance fuel cell with a power density in excess of 4 kWl^{-1} under peak load that fits into an engine bay. Based on this functional model, the “AutoStack-Industrie” project backed by the German Federal Ministry of Transport and Infrastructure is now expected to lay the groundwork for industrialisation by 2021. The association of ten companies from the German automotive and supplier industries and ZSW intends to bring fuel cells up to industrial maturity and to develop processes and procedures for series production. ZSW scientists are looking specifically at the development of fuel cell components and standardised test protocols and procedures.



// Umbau des bestehenden Stadtviertels „Rüsdorfer Kamp“ in Heide/Schleswig-Holstein zur „energieeffizienten Stadt“.
// Conversion of the existing “Rüsdorfer Kamp” quarter in Heide/Schleswig-Holstein to an “energy-efficient city”.



// 100-kW-Brennstoffzellenstack für den Fahrzeugantrieb.
// 100-kW fuel cell stack for vehicle propulsion.

DIE KOMMERZIELLE PRODUKTION VON LITHIUM-IONEN-ZELLEN. Die ZSW-Forschungsplattform

Durch den entstehenden Boom in der Elektromobilität – für 2025 werden weltweit 20 Millionen Fahrzeuge prognostiziert – bestehen aktuell große Engpässe in den weltweiten Produktionskapazitäten für Lithium-Ionen-Zellen. Selbst um konservative Prognosen zu bedienen, werden bis zu 20 Gigafactories für Li-Ionen-Zellen benötigt. Umso bedeutender ist eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen. Hierfür ist das Beherrschen aller Herstellprozesse unter realen Produktionsbedingungen entscheidend. Denn die Qualität, Geschwindigkeit und Robustheit der Prozesse bestimmen die Kosten, Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Zelle.

Um diese Zusammenhänge systematisch aufzuklären und in Deutschland zugänglich zu machen, betreibt das ZSW seit 2014 eine europaweit einmalige „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen“, d. h. Hard-case-PHEV-1-Zellen > 25 Ah, wie sie in Elektrofahrzeugen oder zur Speicherung von erneuerbarer Energie zum Einsatz kommen.

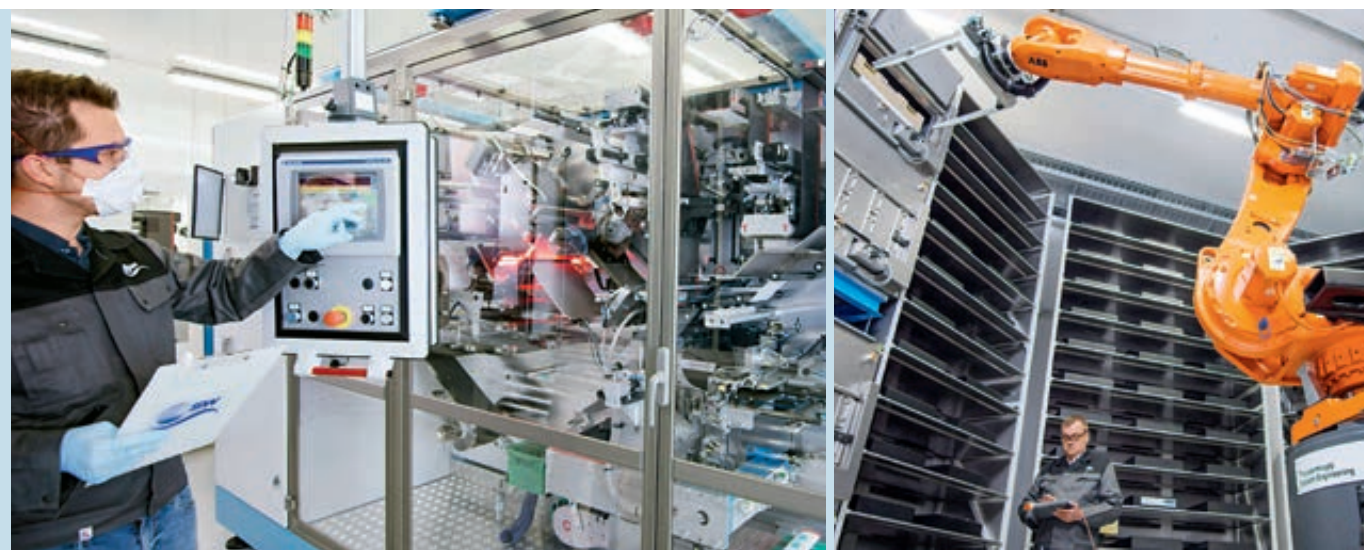
Im Rahmen von Industrie- und Forschungsvorhaben untersuchen die Wissenschaftler produktionsnahe Fragestellungen, von der Anlagenentwicklung über die Verbesserung von Einzelschritten bis zu den Qualitätssicherungsverfahren. Im Fokus stehen das Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten sowie Fragen zur Inline-Sensorik, zu Fertigungstoleranzen oder kosteneffizienten Abläufen. Mit dem Aufbau der FPL wurde die Lücke beim Übergang vom Labormaßstab zur kommerziellen Serienfertigung von Lithium-Ionen-Zellen geschlossen. Mit dem Betrieb werden seither Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung in serienfähige Lösungen überführt, wie dies unter anderem in den vom BMBF geförderten Projekten STACK und QS-Zell demonstriert wird.

COMMERCIAL PRODUCTION OF LITHIUM-ION CELLS. ZSW research platform

The current e-mobility boom, with projections of 20 million vehicles worldwide by 2025, is revealing considerable bottlenecks in global production capacities for lithium-ion cells. Even by conservative estimates, up to 20 gigafactories will be required for lithium-ion cells. Successful further development of lithium-ion cells production processes is therefore of great significance. Key to this is mastering all manufacturing processes under real production conditions since the quality, speed and robustness of the production processes determine the costs, service life and performance capability of the cells.

To systematically clarify these relationships and make them accessible in Germany, ZSW has been operating, already since 2014, a one of its kind in Europe "research platform for the industrial production of large lithium-ion cells (FPL)", i.e. hard-case PHEV-1 cells above 25 Ah as used in electric vehicles or for storage of renewable energy.

As part of industry and research projects, scientists are exploring production-related aspects from system development to improving individual steps, right up to quality assurance processes. Research is focussed on the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in terms of quality, reliability and manufacturing costs as well as issues around inline sensors, manufacturing tolerances and cost-efficient workflows. The FPL research platform has allowed gaps in transitioning from laboratory scale to the commercial series production of lithium-ion cells to be successfully closed. Its operation has since enabled insights from fundamental research to be carried over into series-capable solutions, as demonstrated in the STACK and QS-cell projects funded by the BMBF, amongst others.



// Seriennahe Zellaassemblierung am ZSW im 200-m²-Trockenraum.
// Near-series cell assembly at ZSW in 200 m² dry room.

Ökologische Bewertung alternativer Antriebstechnologien

Ecological assessment of alternative drive technologies

Um technisch ausgereifte und wirtschaftliche Lösungen erfolgreich in die Anwendung zu bringen, müssen weitere Kriterien erfüllt werden, um die Akzeptanz der Nutzer zu finden. Auch wenn die Akzeptanzbildung von sehr vielen Informationen beeinflusst wird, stehen Umweltauswirkungen der neuen Technologie besonders im Fokus. Dabei geht es nicht nur um CO₂-Emissionen und Klimaschutz, sondern auch um Luftschadstoffe, Rohstoffverfügbarkeiten und Recycling. Das ZSW widmet sich auch diesen Aspekten.

To make successful use of technically mature and economically efficient solutions, further criteria need to be satisfied to find acceptance amongst users. Although a wide range of information has a bearing on acceptance, the environmental implications of new technology come under particular scrutiny. Concerns in this regard go beyond CO₂ emissions and climate protection and touch on air pollutants, raw material availability and recycling. ZSW also commits itself to these aspects.

FEINSTAUB UND STICKOXIDE VERMEIDEN. Das Projekt EmoGeFlott

Im Projekt „Potenziale der Elektromobilität in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg (EmoGeFlott)“ untersuchten die ZSW-Wissenschaftler im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg das Reduktionspotenzial für lokale Luftschadstoffemissionen wie Feinstaub und NO_x, das durch den Ersatz von konventionellen Fahrzeugen mit Diesel- bzw. Benzinmotor durch Elektrofahrzeuge erschlossen werden könnte. Dabei wurden jeweils branchenübliche Referenzfahrzeuge mit jeweils nutzungsspezifischen Fahrprofilen für die Vergleichsrechnungen herangezogen, um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Im Ergebnis können durch den Ersatz von alten Dieselfahrzeugen durch Elektrofahrzeuge in Baden-Württemberg bei leichten Nutzfahrzeugen 94 % und bei Pkw 91 % der NO_x-Emissionen sowie 85 % bzw. ca. 30 % der Feinstaubemissionen reduziert werden, was den gesamtgesellschaftlichen Nutzen des Einsatzes von Elektrofahrzeugen unterstreicht.

PREVENT PARTICULATES AND NITROGEN OXIDES. The EmoGeFlott project

The "E-mobility potential in commercial fleets in Baden-Württemberg (EmoGeFlott)" project saw ZSW scientists examine the potential to reduce local air pollutant emissions such as particulates and NO_x, conceivable by replacing conventional diesel and petrol engine powered vehicles with electric vehicles, on behalf of the Baden-Württemberg Ministry of Transport. The research involved using the standard industry specifications of reference vehicles with corresponding usage-specific driving profiles for comparative calculations to achieve as realistic a result as possible. Results indicate the potential to reduce NO_x emissions in Baden-Württemberg by 94% for light commercial vehicles and by 91% for passenger vehicles and particulate emissions by 85% and approx. 30% respectively by replacing old diesel vehicles with electric vehicles, underlining the overall social benefit of their use.



// Potenzialanalyse zum Einsatz von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg.
// Potential analysis for use of electric vehicles in commercial fleets in Baden-Württemberg.

RESSOURCEN SCHONEN. Kobaltfreie Batterien im Projekt Li-EcoSafe

Die Verfügbarkeit sicherer, umweltverträglicher und kostengünstiger Lithium-Ionen-Batterien ist eine zentrale Herausforderung für die Elektromobilität und für die Zwischenspeicherung regenerativer Energien. In allen gängigen Lithium-Ionen-Zellen wird Kobalt als Kathodenmaterial verwendet, auch in neuartigen Kombinationen. Es sorgt für die nötige Stabilität und Energiedichte sowie bei Hochleistungs-Akkus für Autos oder stationäre Speicher für die nötige Lebensdauer und Reichweite. Kobalt gilt aber als toxisch, ist auf der Erde nur begrenzt verfügbar und wird von der Europäischen Union als kritischer Rohstoff eingestuft.

Um Kobalt künftig zu ersetzen, hat das ZSW bereits 2015 im Projekt „Li-EcoSafe“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ein neues, kobaltfreies Kathodenmaterial auf der Basis von Lithium-Nickel-Manganoxid ($\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$) entwickelt und im Labormaßstab erzeugt. Die neue Materialkombination zeigt eine sehr gute Leistungs- und Energiedichte bei hinreichender Sicherheit. Derzeit soll die Funktions- und Prozessfähigkeit des Materials durch Zell-Prototypen demonstriert werden.

Am ZSW sollen schrittweise vom Labor bis zum Industriemaßstab großformatige PHEV-1-Zellen > 25 Ah entwickelt und hergestellt werden. Hierfür sind mehrere Kilogramm Materialpulver zum Beschichten der Elektroden notwendig. Zur Entwicklung des Syntheseprozesses wurde 2018 das Syntheselabor um Reaktoren für bis zu 30 Kilogramm Materialpulver erweitert.

PROTECTING RESOURCES. Cobalt-free batteries in Li-EcoSafe project

The availability of safe, environmentally compatible and cost-effective lithium-ion batteries is a central challenge for e-mobility and for the intermediate storage of renewable energies. Cobalt is used today in the cathode material of all common lithium-ion cells, also in innovative combinations. It ensures the necessary stability and energy density and also the necessary lifespan and range in high-performance batteries for cars or stationary storage facilities. Cobalt, however, is toxic and its availability as a raw material is limited. It has also been designated a critical raw material by the European Union.

To replace cobalt in the future, ZSW developed and produced a new, cobalt-free cathode material based on lithium-nickel manganese oxide ($\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$) at laboratory scale already in 2015 in the “Li-EcoSafe” project funded by the German Federal Ministry of Education and Research. The new material combination demonstrates an excellent performance and energy density with adequate safety. The functional and process capability of the material through cell prototypes are currently being illustrated.

The current aim at ZSW is to progressively develop and produce large-scale PHEV-1 cells >25 Ah from laboratory to industrial scale. This will require several kilograms of material powder for the coating of electrodes. To facilitate their production, the synthesis laboratory was expanded in an initial phase in 2018 to include reactors for up to 30 kilograms of material powder.



// Synthesereaktoren am ZSW zur Herstellung von bis zu 30 Kilogramm Aktivmaterial.
// New synthesis reactors at ZSW for producing up to 30 kilograms of active material.

Die Akzeptanz der Energiewende in der Gesellschaft

Acceptance of energy transition in society

AUF DEM WEG ZUR GESELLSCHAFTLICHEN TRANSFORMATION. Das Projekt ENavi

Das Erreichen der Klimaschutzziele bedarf nicht nur des Einsatzes neuer Technologien und damit einer technologischen Transformation, sondern eines grundlegenden gesellschaftlichen Wandels. Wie dieser gestaltet werden kann und muss, wird im Rahmen des vom BMBF geförderten Kopernikus-Projektes ENavi zur Systemintegration untersucht. Im Mittelpunkt steht die Aufgabe, Transformationsprozesse zu modellieren und ihre intendierten und nicht-intendierten direkten und indirekten Wirkungen bzw. Folgen zu erfassen und zu analysieren. Ziel ist es, nachhaltige Entwicklungspfade zu identifizieren und Politikinstrumente zu entwickeln, deren Implementierung eine Umsetzung der Pfade erlaubt.

Das ZSW beteiligt sich hieran u. a. mit einem agentenbasierten Modell zur Analyse der Diffusion von Elektrofahrzeugen. Hiermit kann die Wirkung von Politikmaßnahmen ex ante, d. h. vor deren Implementierung, prognostiziert werden. Über die Vorab-Folgenabschätzung und Modifikation der Politikinstrumente ebenso wie durch den im Rahmen des Projekts stattfindenden transdisziplinären Diskurs, d. h. die Einbindung wichtiger Vertreter der unterschiedlichen gesellschaftlichen Gruppen, kann eine deutlich höhere Wirksamkeit der Maßnahmen erzielt werden. Dies wiederum kann das Vertrauen in die politische Umsetzung der Energiewende und damit deren Akzeptanz in der Bevölkerung stärken. Dies ist deshalb so wichtig, weil der eingangs beschriebene notwendige Transformationsprozess nur gemeinsam mit und durch die Gesellschaft gelingen kann.

EN ROUTE TO SOCIETAL TRANSFORMATION. ENavi project

Achieving climate change targets not only requires the use of new technologies and thus a technological transformation, but also a fundamental shift in society. How this can and must be brought about is looked at in the ENavi Kopernikus project for system integration, backed by the German Federal Ministry of Education and Research. The work centres around modelling transformation processes and recording and analysing their intended and unintended direct and indirect implications and consequences. The aim is to identify sustainable development paths and to develop political tools that can be used to enable such paths to be taken.

ZSW is involved with an agent-based model for analysing the spread of electric vehicles, among other contributions. The model allows the implications of political measures to be predicted ex ante, i.e. before being implemented. Much greater efficacy can thus be achieved by means of this advanced impact assessment and the modification of political tools and, similarly through transdisciplinary debate, i.e. involving key representatives of societal groups. As a result, improved trust in the political implementation of the energy transition and, consequently, its acceptance among the population at large is expected. This is particularly crucial given that any success in implementing the essential transformation process described at the outset rests upon efforts with and through society.

Das ZSW unterstützt die notwendigen Prozesse auf dem Weg zur Mobilität der Zukunft auf sehr unterschiedliche Weise, jedoch immer mit dem Ziel, technische Lösungen zu entwickeln, die ökonomisch und ökologisch tragfähig und gesellschaftlich akzeptiert ein langfristig klimaneutrales und nachhaltiges Energie- und Mobilitätssystem gestalten.

ZSW supports the necessary processes en route to future mobility in a variety of different ways, however with a unifying purpose: to develop technical solutions aimed at delivering a long-term climate-neutral and sustainable energy and mobility system that enjoys the acceptance of society and boasts favourable economical and environmentally sustainable credentials.



// Der für eine erfolgreiche Energiewende notwendige gesellschaftliche Wandel steht im Mittelpunkt des Kopernikus-Projektes ENavi.
// The necessary societal shifts in order to successfully achieve the energy transition is the focus of the ENavi Kopernikus project.



// Fachgebiete und
Projekte

// Departments and
Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet Systemanalyse stellt sich der Aufgabe, die vielfältigen für das Erreichen der Klimaschutzziele erforderlichen Transformationsprozesse aktiv zu begleiten. Ziel ist der vollständige Verzicht auf fossile Energieträger und eine nachhaltig klimaneutrale Gestaltung der Energieversorgung und der Wirtschaftssysteme bis zum Jahr 2050.

Die strategische Systemanalyse übernimmt Evaluations- und Monitoringaufgaben, um Fortschritte, aber auch Hemmnisse aufzuzeigen, Lösungsräume auszuloten und Instrumente zu entwickeln, die die Energiewende voranbringen. Ergänzt wird dies durch Wirkungsanalysen für Einzelmaßnahmen ebenso wie für Maßnahmenbündel, um potenzielle Fehlentwicklungen möglichst bereits vor der Implementierung zu erkennen und Modifikationen vorzuschlagen. Potenzial- und Entwicklungsanalysen auf Technologieebene werden eingesetzt, um robuste Zukunftspfade zu identifizieren und No-regret-Strategien abzuleiten.

Für die Analyse der Integration erneuerbarer Energien und Anwendungstechnologien werden unterschiedliche Modelle und Analyse-Tools eingesetzt. So nutzt das Team „Simulation und Optimierung“ Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens für die Optimierung von Vorhersagesystemen für die Einspeisung von Wind-, Solar- und Wasserkraftstrom. Das Team „Windenergie“ arbeitet zusammen mit dem Forschungcluster WindForS am Aufbau und der Inbetriebnahme des weltweit ersten Windenergieforschungstestfelds in bergig-komplexem Gelände. Einer der stärksten Konflikte hinsichtlich der Windenergienutzung tritt aktuell im Bereich Natur- und Artenschutz auf. Um auch diesbezüglich Lösungsoptionen anbieten zu können, wurde auf dem Windenergie-testfeld ein zusätzlicher Schwerpunkt zur Naturschutzbegleitforschung etabliert. Hier kommt wiederum das Know-how aus dem Bereich des maschinellen Lernens bei der Entwicklung von Erkennungssystemen für gefährdete Vogelarten zum Einsatz.

// Our main focus

The Systems Analysis department is dedicated to actively supporting the various transformation processes required to achieve climate protection targets. The objective is to fully dispense with fossil fuels and bring about a sustainable, climate-neutral design both of energy supply and economic systems by 2050.

Strategic Systems Analysis is responsible for evaluations and monitoring tasks in order to identify progress and obstacles, explore solution options and develop instruments to support the energy transition. This is supplemented by impact analyses for individual measures and for packages of measures to identify potentially undesirable developments and propose modifications prior to implementation wherever possible. Potential and development analyses on a technological level are applied to identify robust future paths and derive “no regrets” strategies.

Various models and analysis tools are used to analyse the integration of renewable energy sources and application technologies. For example, the Simulation and Optimisation team uses machine learning methods to optimise forecasting systems for wind, solar and hydroelectric power feed-in. The Wind Energy team and the WindForS research cluster are collaborating to build and commission the world’s first wind energy research test site in a mountainous and complex terrain. One of the greatest conflicts relating to the use of wind energy emerges in the area of nature and species conservation. An additional focal point to support nature conservation research has been established at the wind energy test site to offer relevant solutions in this area. Machine learning expertise is applied to the development of detection systems for endangered bird species.



„Die Energiewende ist aufgrund ihrer Komplexität auf umfassendes transformatives Wissen angewiesen. Für ihren Erfolg ist die Systemanalyse deshalb von großer Bedeutung, weil sie dies bietet und wichtige Impulse für Entscheidungen in Politik und Wirtschaft geben kann.“

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

“The energy transition depends on comprehensive transformative knowledge due to its complexity. Systems Analysis is of great importance for its success because it provides that knowledge and can guide important decisions in politics and business.”



// Naturschutzforschung im Windenergietestfeld

Weil Windenergieanlagen eine potenzielle Gefahr für Vögel und Fledermäuse darstellen, wächst mit dem Ausbau der Windenergie auch das Konfliktpotenzial zwischen Klima- und Artenschutz. So stellt die potenzielle Gefährdung von Individuen geschützter Arten wie Rotmilane, deren Reviere sich in der Nähe der Anlagenstandorte befinden, immer häufiger ein gravierendes Hindernis für die Genehmigung von Windenergieanlagen dar. Maßnahmen zur Senkung des Kollisionsrisikos rücken daher verstärkt in den Fokus. Diese reichen von der speziellen Gestaltung der direkten Anlagenumgebung über Abschaltzeiten bis zur Entwicklung neuartiger technischer Systeme, die Vögel im direkten Umfeld detektieren und durch Anlagenstopp, Drosselung oder Vergrämung schützen sollen.

Naturschutzforscher schlagen vielfältige Konzepte vor, können deren Wirksamkeit aber zumeist nicht hinreichend testen, weil sie keinen direkten Zugriff auf die Windenergieanlagen haben. Das ZSW schafft hier im Rahmen seiner Arbeiten Abhilfe: In dem vom ZSW geleiteten, auf mehrere Jahre angelegten und von Bundesumweltministerium und Bundesamt für Naturschutz finanzierten Vorhaben „Umsetzung der Naturschutzforschung im Windtestfeld an Land (NatForWINSENT II)“ entwickeln renommierte Vogel- und Fledermausforscher innovative Vermeidungsmaßnahmen. Diese können sie mit Zugriff auf die im Testfeld erfassten Messdaten und das Betriebsregime der Anlagen umfassend auf ihre Praxistauglichkeit testen. In verschiedenen Begleitkreisen sind neben einschlägigen Experten auch maßgebliche Akteure wie Umweltverbände und Umwelt- und Genehmigungsbehörden in das Projekt eingebunden. Damit sind die Voraussetzungen dafür geschaffen, dass die im Rahmen der Forschung gewonnenen Erkenntnisse auch unmittelbar in die Genehmigungspraxis einfließen können. Ziel ist es, Artenschutz und Klimaschutz bei der Nutzung von Windenergie in Einklang zu bringen.

// Nature conservation research at the wind energy test site

Because wind turbines could pose a threat to birds and bats, the potential for conflict between climate protection and species conservation rises with the expansion of wind energy. For example, the potential threat to individuals of protected species such as red kites, whose territories are close to wind turbine sites, is increasingly becoming a serious obstacle to obtaining construction approval for wind turbines. Measures taken to reduce the risk of collisions are therefore becoming increasingly important. They range from a special arrangement of the immediate turbine environment and shut-off times to the development of novel technical systems that detect birds in the immediate vicinity and protect them by halting or throttling the turbines or by deterring the birds.

Nature conservation researchers propose a variety of concepts but are usually unable to adequately test their effectiveness because they do not have direct access to the wind turbines. ZSW is able to remedy this situation as part of its work. In the project “Implementation of nature conservation research at onshore wind test sites (NatForWINSENT II)”, which is managed by ZSW and is scheduled to run for several years with funding granted by the German Federal Environment Ministry and the Federal Agency for Nature Conservation, renowned bird and bat researchers are developing innovative collision prevention measures. With access to the measurement data recorded at the test site and the operating modes of the turbines, they are able to comprehensively test the practical suitability of these measures. In addition to the relevant experts, important stakeholders such as environmental and conservation organisations, environmental protection agencies and regulatory authorities are also involved in the project. This arrangement creates the right conditions for the research findings to be put into practice in terms of approvals. The aim is to harmonise species conservation and climate protection where wind energy use is concerned.



// Die Standortsuche für Windparks wird zunehmend durch das Vorkommen geschützter Vögel wie Rotmilane erschwert.
// Finding a site for wind turbine installations is increasingly impeded by the presence of protected bird species such as red kites.

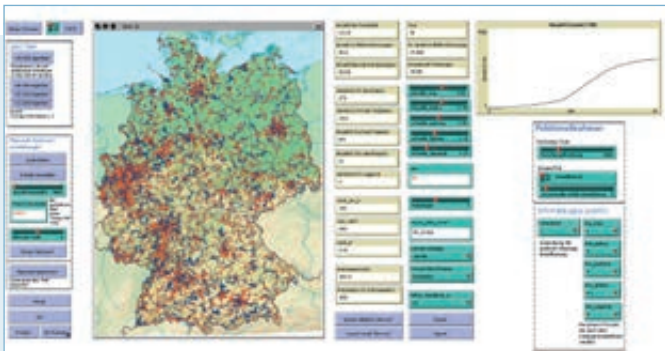
// Dr. Frank Musiol
E-mail: frank.musiol@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-217



// Simulation der Diffusion von E-Mobilität

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekts ENavi beschäftigt sich das Fachgebiet Systemanalyse intensiv mit Fragen der Technologieentwicklung, mit Innovationsverläufen und insbesondere mit der Diffusion neuer Technologien im Markt. Um die Wirkung von politischen Interventionen auf Diffusionsverläufe transparent machen, Interdependenzen erkennen und hieraus Schlussfolgerungen für die Ausgestaltung von Politikinstrumenten ziehen zu können, wurde ein agentenbasiertes Modell für den Bereich der Elektromobilität entwickelt. Es kann die Diffusionsverläufe der Elektromobilität in Deutschland unter verschiedenen Randbedingungen simulieren und wird im weiteren Projektverlauf in Richtung eines In-silico-Politiklabors ausgebaut. Agentenmodelle sind besonders geeignet, die Heterogenität der Akteure ebenso wie die Interdependenz des Entscheidungsverhaltens adäquat abzubilden.

Das Simulationsmodell basiert im konkreten Fall auf dem Entscheidungsverhalten von Haushalten bei der Wahl zwischen den Fahrzeugalternativen „herkömmliches Fahrzeug“ und „Elektrofahrzeug“, die durch jeweils individuelle Eigenschaften (Preis, Reichweite, etc.) gekennzeichnet sind. Gleichzeitig unterscheiden sich auch die Haushalte u. a. hinsichtlich ihrer Innovationsaffinität, ihrer geografischen Situation, der Anzahl vorhandener Fahrzeuge sowie des sie beeinflussenden individuellen sozialen Netzwerks. Mithilfe des Modells können nunmehr verschiedene Politikmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit, u. a. hinsichtlich effektiver Diffusion sowie Diffusionsverlauf und -geschwindigkeit, analysiert werden. Das Modell eignet sich dabei gleichermaßen für die Wirkungsanalyse von „Demand-Pull“-Interventionen (bspw. Kaufprämien) wie für „Technology-Push“-Interventionen (bspw. Förderung der Batterieforschung). Auf Basis der Analyseergebnisse können Empfehlungen für die Komposition zukünftiger, zielgerichtet wirkender Maßnahmenbündel für die Politik abgeleitet werden.



// Simulation of e-mobility diffusion

The Systems Analysis department is working intensively on questions of technological development, innovation processes and, in particular, the diffusion of new technologies in the market as part of the Kopernikus project ENavi, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research. An agent-based model for the field of e-mobility was developed in order to render the effect of political interventions on diffusion processes more transparent, and to identify interdependencies and draw conclusions for the design of policy instruments. It can simulate the diffusion processes of e-mobility in Germany within the constraints of various boundary conditions and will be expanded to an in-silico policy laboratory in the further course of the project. Agent models are particularly suitable for adequately mapping the heterogeneity of actors as well as the interdependence of decision-making behaviour.

In the concrete case at hand, the simulation model is based on the decision-making behaviour of households when choosing between the vehicle alternatives of “conventional vehicle” and “electric vehicle”, which are each characterised by individual properties (price, range, etc.). At the same time, households also differ in terms of their affinity for innovation, their geographical situation, the number of existing vehicles and the individual social network that influences them, among other things. With this model, various policy measures can now be analysed in terms of their effectiveness, e.g. with regard to effective diffusion as well as course and rate of diffusion. The model is as suitable for impact analyses of “demand-pull” interventions (for example, purchase premiums) as it is for “technology-push” interventions (for example, promotion of battery research). Recommendations on the composition of future, target-oriented packages of measures for policy makers can be derived on the basis of the analysis results.

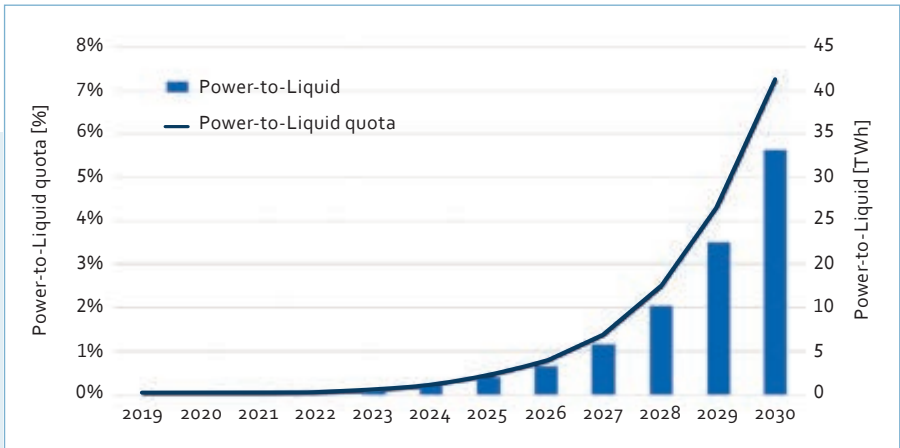
// Visualisierung des Simulations-Tools.
// Visualisation of the simulation tool.

// Dr. Tobias Buchmann
E-mail: tobias.buchmann@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-329

// Beitrag strombasierter Kraftstoffe zum Klimaschutzziel in Baden-Württemberg

Das Fachgebiet Systemanalyse untersuchte gemeinsam mit dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) im Rahmen einer Kurzstudie im Auftrag des Verkehrsministeriums Baden-Württemberg, welchen Beitrag strombasierte regenerative Kraftstoffe im Jahr 2030 zur Minderung der Treibhausgasemissionen im Verkehr in Baden-Württemberg leisten könnten, und diskutierten die erforderlichen Rahmenbedingungen hierfür. Ausgangspunkt der Untersuchung war die bestehende Diskrepanz zu dem auf Landesebene für 2030 diskutierten Sektorziel von -29 % für den Verkehr zu dem Minderungsziel im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung von -40 bis -42 % gegenüber 1990.

Ein erster Schritt war die Analyse des Entwicklungsstands der notwendigen Technologien und eine Ableitung der erforderlichen Zeit bis zur Kommerzialisierung und bis zum möglichen großtechnischen Einsatz. Dafür wurden Randbedingungen wie die Dauer für Genehmigungsprozesse, Anlagenbau- und Inbetriebnahmezeiten etc. untersucht. Hieraus konnte ein potenzieller Power-to-Liquid-(PtL)-Hochlaufpfad bis 2030 abgeleitet werden, der dabei ausschließlich den Aufbau von Erzeugungskapazitäten in der Middle East-& North Africa-(MENA)-Region vorsieht (s. Abb. unten). Dieser skizziert einen möglichen PtL-Anteil am Gesamtkraftstoffverbrauch in Deutschland und Baden-Württemberg in Höhe von 7 %. Für Baden-Württemberg würde dies eine zusätzliche THG-Minderung von 5 %-Punkten bedeuten, sodass eine Reduktion um 34 % möglich würde. PtL-Kraftstoffe könnten somit die bestehende Lücke zum Bundesziel von -40 % verringern, sofern alle weiteren Maßnahmen mit gleicher Intensität fortgesetzt werden.



// Potenzieller Power-to-Liquid-(PtL)-Ausbau für die Beimischung von strombasierten Kraftstoffen in Deutschland.
// Potential Power-to-Liquid (PtL) expansion path for the admixture of electricity-based fuels in Germany.

// Anna-Lena Fuchs
E-mail: anna-lena.fuchs@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-353

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)



// Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschicht-Technologien bietet ein hohes Potenzial zur Kostensenkung bei der Herstellung von Photovoltaikmodulen. Insbesondere die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende CIGS-Technologie hat sich hier bereits in der industriellen Produktion bewährt. Im Fachgebiet MAT werden im Technikum CIGS-Module auf Glas mit einer Größe bis 30 x 30 cm² bzw. auf flexiblen Substraten mit einer Breite bis max. 30 cm auf beliebiger Länge im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt und in ihrer Funktionalität weiterentwickelt.

Zur Herstellung der CIGS-Module im ZSW-Technikum werden anders als in einem typischen Laborbetrieb weitgehend Durchlaufprozesse und damit sehr industriennahe Verfahren eingesetzt. Aktuell werden auf Glassubstrat insbesondere im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Vorhabens CISHiTec sowohl verbesserte als auch neue Prozesse für den Transfer in die Industrie erarbeitet. In einem zweiten Technikum wird der Einsatz von flexiblen Substratmaterialien wie Polymer- oder Metallfolien für die Rolle-zu-Rolle-Beschichtung erarbeitet. Neue Dünnschicht-Materialsysteme wie Perowskite bieten das Potenzial, kostengünstige Drucktechnologien einzusetzen, und werden in einem eigenen Labor weiterentwickelt. Auch zukünftige weitere Verbesserungen durch den Aufbau von Mehrfachzellen, etwa in der Kombination Perowskit und CIGS, werden am ZSW erforscht.

Die langjährigen Erfahrungen des MAT-Teams in der Entwicklung und Charakterisierung von CIGS-Solarmodulen fließen in Dienstleistungen für die Industrie ein: Im Kundenauftrag bearbeiten wir vielfältige materialanalytische Aufgabenstellungen (z. B. hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse) oder die optische und elektrische Charakterisierung von Zellen und Modulen.

// Our main focus

The use of thin-film technologies offers considerable potential for reducing costs in the manufacture of photovoltaic solar modules. Copper, indium, gallium and selenium-based CIGS technology has proved to be particularly suitable for industrial production. The MAT research department at ZSW runs a laboratory pilot line to produce and further develop the functionalities of CIGS modules on glass in sizes of up to 30 x 30 cm² as well as on flexible substrates over widths of up to 30 cm and any length with the roll-to-roll method.

In contrast to typical laboratory operations, in-line processes that closely mirror industrial processes are largely used to produce the CIGS modules in ZSW's technical lab. Both novel and improved processes are currently being developed for CIGS on glass substrates for transfer to the industrial sector, especially as part of the CISHiTec project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. The use of flexible substrate materials such as polymers or metal foils for roll-to-roll coating is being developed in a second technical lab. New thin-film material systems such as perovskites, which offer the potential to use cost-effective printing technologies, are also being further developed in a dedicated laboratory. ZSW is also investigating further future improvements through constructing multijunction cells, for example by combining perovskites and CIGS.

The MAT team's long-standing experience in developing and characterising CIGS solar modules is also being leveraged for industrial services. In response to customer orders, we provide various material analysis services (such as high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis) or optical and electrical characterisation of cells and modules.

// Vertieftes Verständnis hoch effizienter CIGS-Dünnschicht-Solarzellen

Im europäischen Forschungsprojekt „Sharc25“, das 2018 nach 3,5 Jahren Laufzeit erfolgreich abgeschlossen wurde, koordinierte das ZSW die Präparations-, Simulations- und Analytikaktivitäten von elf europäischen Partnern aus acht Ländern. Ziel war es, hoch effiziente CIGS-Dünnschicht-Solarzellen auf Weltrekordniveau detailliert zu untersuchen, Verlustmechanismen zu identifizieren und neue Konzepte zur Wirkungsgradsteigerung zu entwickeln und zu implementieren. Die Effizienz der CIGS-Solarzellen konnte um rund einen Prozentpunkt (s. Abb. unten) vor allem durch verbessertes Absorbermaterial und optimierte Ober- und Grenzflächen gesteigert werden.

Wesentlichen Anteil hatte das wirkungsgradsteigernde sogenannte Post-Deposition-Treatment (PDT) mit dem Alkalielement Rubidium (Rb). Dieser PDT-Prozess wird typischerweise nach der CIGS-Beschichtung und vor der Pufferabscheidung durchgeführt. Ergänzende theoretische Rechnungen zu Diffusionsverhalten und Phasenbildung bei Anwesenheit verschiedener Alkalimetalle halfen dabei, die Effekte des Rb besser zu verstehen und das Zusammenspiel mit anderen vorhandenen Alkalielementen wie Natrium und Kalium für optimierte PDT-Prozesse zu nutzen. Das durch PDT eingebrachte Rb reichert sich an der Grenzfläche zwischen CIGS und nasschemisch abgeschiedenem Puffer an, und es ist sehr wahrscheinlich, dass sich dort eine AlkInSe₂-Phase wie RbInSe₂ bildet. Ein Rekord-Wirkungsgrad von 22,6 % (s. Abb. unten) konnte mit einer CIGS-Solarzelle erreicht werden, die einen CIGS-Absorber mit RbF-PDT mit einem sehr dünnen, nasschemisch abgeschiedenen CdS-Puffer in Kombination mit einer gesputterten (Zn,Mg)O-Schicht beinhaltet.

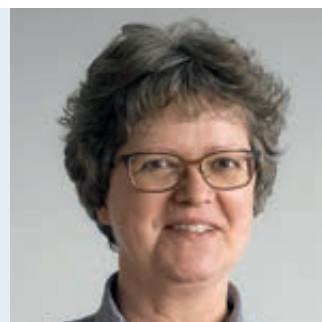
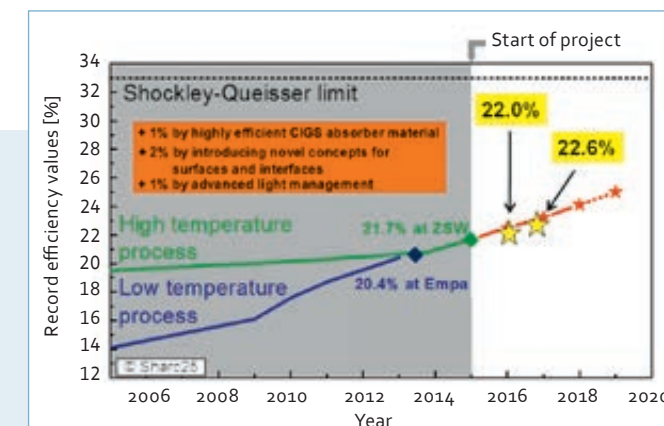
// In-depth understanding of highly efficient CIGS thin-film solar cells

In the Sharc25 European research project, which was successfully completed in 2018 after 3.5 years, ZSW coordinated the preparation, simulation and characterisation activities of eleven European partners from eight countries. The aim was to investigate highly efficient CIGS thin-film solar cells at world-record level in detail, identify loss mechanisms as well as develop and implement new concepts to increase efficiency. The efficiency of CIGS solar cells was successfully increased by about one percentage point (see figure below), mainly by using improved absorber material as well as optimised surfaces and interfaces.

A major role was played by the efficiency-enhancing post-deposition treatment (PDT) with the alkali element rubidium (Rb). This PDT process is typically performed after the CIGS coating and before the buffer deposition. Supplementary theoretical calculations on diffusion behaviour and phase formation in the presence of different alkali metals helped to better understand the effects of Rb and to utilise the interaction with other alkali elements such as sodium and potassium which are already present in the film for optimised PDT processes. The Rb introduced by PDT accumulates at the boundary between the CIGS and the chemical-bath-deposited buffer, and it is very likely that an AlkInSe₂ phase such as RbInSe₂ forms there. A record efficiency of 22.6% (see figure below) was achieved with a CIGS solar cell containing a CIGS absorber with RbF-PDT and a very thin chemical-bath-deposited CdS buffer in combination with a sputtered (Zn,Mg)O-layer.



// Projekt-Roadmap von Sharc25 mit den Effizienzwerten beim Projektstart und den im Projektverlauf erreichten 22,0 bzw. 22,6 % (alle Effizienzen mit Antireflexschicht gemessen).
// Sharc25 project roadmap with the efficiency values at the start of the project and the 22.0 and 22.6% values achieved during the project (all efficiencies measured with anti-reflective coating).



„Durch unsere kontinuierliche Verbesserung der CIGS-Photovoltaik – höhere Erträge, schnellere Produktionsprozesse, neue Materialien für die nächste Generation – leisten wir unseren Beitrag zur Energiewende.“

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

“Through our continuous improvement of CIGS photovoltaics – with higher yields, faster production processes and new materials for the next generation – we are making our contribution to the energy transition.”

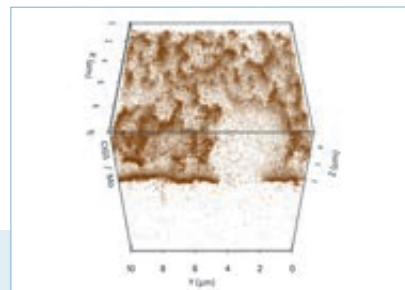
// Dr. Wolfram Witte
E-mail: wolfram.witte@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-292



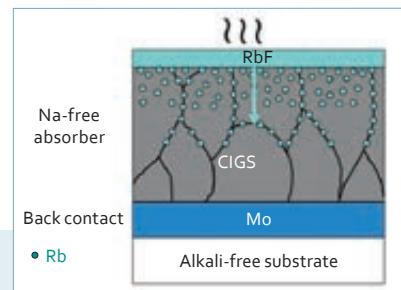
// Hoch auflösende Analysemethoden klären Wirkungsweise von Alkali-Nachbehandlung bei CIGS-Solarzellen

Alkalielemente sind bei der Herstellung von CIGS-Dünnschicht-solarzellen das „Salz in der Suppe“. Schon kleinste Mengen Natrium (0,3 Promille) tragen zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads von bis zu 50 % bei. Lange Zeit galt Natrium als wichtigstes Alkalielement, um die Effizienz von polykristallinen CIGS-Solarzellen zu optimieren. Im Jahr 2013 stellte man allerdings fest, dass auch das schwerere Alkalielement Kalium zu einer deutlichen Wirkungsgradsteigerung führt. Die letzten Wirkungsgradrekorde von bis zu 22,6 % erzielte das ZSW mithilfe einer Rubidium-Fluorid-Nachbehandlung. Dabei wurde beobachtet, dass das schwerere Alkalielement Rubidium das leichtere Natrium aus der CIGS-Schicht verdrängt.

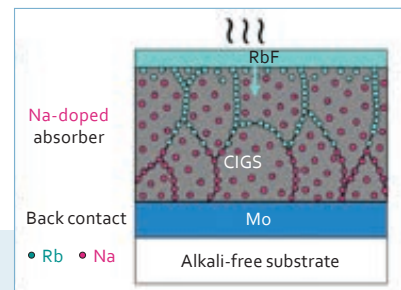
Um diesen Vorgang genauer zu verstehen, wurde die Verteilung der Alkalimetalle dreidimensional orts aufgelöst gemessen (mit 3D-ToF-SIMS). Die Messung (s. Abb. unten links) zeigt, dass Rubidium an den Korngrenzen stark angereichert ist, aber auch im Volumen der Körner bis zu einer Konzentration von 16 ppm (parts per million) vorliegt, was üblichen Dotierkonzentrationen von Halbleitern entspricht. Diffusionsmessungen zeigten, dass Rubidium stärker entlang der Korngrenzen diffundiert, wenn vorher schon Natrium in der Schicht vorhanden war. Hierbei verdrängt das schwerere Rubidium das leichtere Natrium vornehmlich aus den Korngrenzen und passiviert somit besser die sonst elektrisch schädlichen Korngrenzen (s. Abb. unten rechts). Neueste Analysemethoden wie die massenspektrometrische Tiefenprofilierung (ToF-SIMS) sind dabei außerordentlich hilfreich, um mikroskopisch kleine Vorgänge besser verstehen zu können.



// ToF-SIMS-Messung einer CIGS-Schicht nach einer RbF-Nachbehandlung.
// ToF-SIMS measurement of a CIGS layer after RbF post-treatment.



// Bei einer natriumfreien CIGS-Schicht diffundiert Rubidium sowohl entlang der Korngrenzen als auch ins Korninnere.
// In a sodium-free CIGS layer, rubidium diffuses both along the grain boundaries and into the grain interior.



// ToF-SIMS-Messung einer natriumhaltigen CIGS-Schicht.
// ToF-SIMS measurement of a sodium-containing CIGS layer.

// Dr. Roland Würz
E-mail: roland.wuerz@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-220

// High-resolution analytical methods resolve the effect of alkali post-treatment in CIGS solar cells

Alkali elements are the “salt in the soup” in the manufacture of CIGS thin-film solar cells. Even the smallest amounts of sodium (0.3 per mill) help to increase efficiency by up to 50%. For a long time, sodium was regarded as the most important alkali element used to optimise efficiency of polycrystalline CIGS solar cells. In 2013, however, it was discovered that the heavier alkali element potassium also leads to a significant increase in efficiency. The last efficiency records of up to 22.6% were achieved by ZSW with the aid of a rubidium fluoride post-treatment. Here it was observed that the heavier alkali element rubidium displaces the lighter sodium from the CIGS layer.

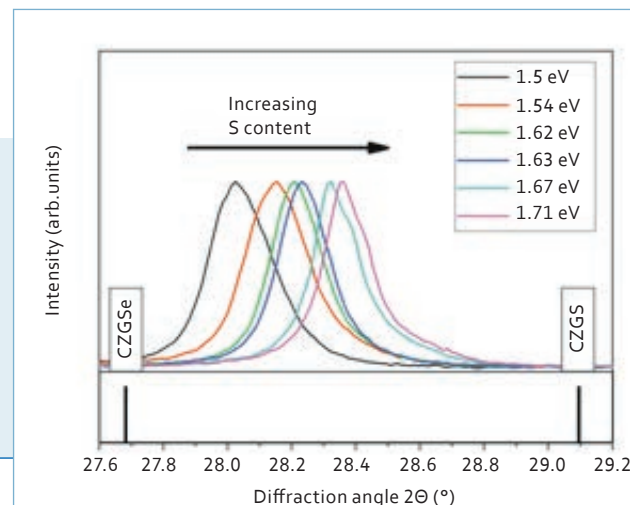
In order to better understand this process, the distribution of the alkali metals was measured with three-dimensional spatial resolution (with 3D ToF-SIMS). The measurement (see fig. below left) shows that rubidium is highly concentrated at the grain boundaries, but is also present in the volume of the grains up to a concentration of 16 ppm (parts per million), which corresponds to the usual doping concentrations of semiconductors. Diffusion measurements showed that rubidium diffuses more strongly along the grain boundaries when sodium was already present in the layer. The heavier rubidium mainly displaces the lighter sodium from the grain boundaries and is thus thought to better passivate the grain boundaries (see figure below right). The latest analytical methods, such as mass spectrometric depth profiling (ToF-SIMS), are extremely helpful in better understanding small processes microscopically.

// Hochband-Kesterit-Solarzellen

Im Jahr 2018 wurde das europäische Forschungsprojekt „SWING“ zur Erforschung von neuartigen Kesterit-Solarzellen mit hoher Bandlücke erfolgreich abgeschlossen. Klassische Kesterite der Zusammensetzung $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ ähneln dem etablierten $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -(CIGS)-Material, nutzen aber reichhaltig verfügbare Elemente wie Zink und Zinn und versprechen somit, die CIGS-Technologie in einer kostengünstigeren Variante fortzuführen. In diesem Projekt war ein Kesterit-Material mit hoher Bandlücke zu entwickeln, das perspektivisch für Tandemanwendungen verwendet werden könnte (siehe nachfolgender Bericht). Das ZSW hat dabei lösungsprozessierte Materialien wie etwa das Mischmaterial $\text{Cu}_2\text{ZnGe}(\text{S,Se})_4$ optimiert. Die Bandlücke kann über den Schwefelgehalt von 1,4 bis 2,0 eV variiert werden. Mit einem sehr einfachen, lösungsbasierten Prozess konnten am ZSW Wirkungsgrade bis zu 6 % realisiert werden.

// Tandem-Solarzellen aus CIGS und Perowskit

Das ZSW entwickelt nicht nur reine CIGS-Solarzellen, sondern auch Stapelzellen aus den Dünnschicht-Absorbermaterialien CIGS und Perowskit. Hierbei wandelt eine Perowskitzelle das Licht im sichtbaren Teil des Sonnenspektrums in Strom um, während das Licht im Infrarot-nahen Spektrum, das die Perowskitzelle durchdringt, von einer CIGS-Solarzelle aufgefangen wird. Durch eine erhöhte Transmission der Perowskitzelle für Licht im Infrarot-nahen Spektrum mit verbesserten transparenten Elektroden konnte ein Wirkungsgrad von 15,1 % erzielt werden. Auch der Gesamtwirkungsgrad wurde 2018 kontinuierlich verbessert. Weitere Optimierungen dieser Technologie werden letztlich den Weg für Dünnschicht-solarzellen mit Wirkungsgraden von bis zu 30 % ebnen.



// High bandgap kesterite solar cells

In 2018, the SWING European project for researching innovative kesterite solar cells with high bandgaps was successfully completed. Standard kesterites with the $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ composition resemble the established $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) material, but use abundant elements such as zinc and tin and their production can be based on the technology developed for CIGS, but in a more cost-effective variant. This project aimed to develop a kesterite material with a high bandgap which could be used in the future for tandem applications (see following report). ZSW has optimised solution-processed materials for this purpose such as the mixed $\text{Cu}_2\text{ZnGe}(\text{S,Se})_4$ material. The bandgap can be varied from 1.4 to 2.0 eV by changing the sulphur content. Using a very simple, solution-based process, efficiencies of up to 6% were achieved at ZSW.

// Tandem solar cells from CIGS and perovskites

ZSW is not only developing pure CIGS solar cells but also stacked cells employing the thin-film absorber materials CIGS and perovskite. Here, a perovskite cell converts the light in the visible part of the solar spectrum into electricity, while the light in the near infrared spectrum that penetrates the perovskite cell is captured by a CIGS solar cell. Increasing the transmission of the perovskite cell for light in the near infrared spectrum with improved transparent electrodes enabled an efficiency of 15.1% to be achieved. Overall efficiency was also continuously improved in 2018. Further optimisations of this technology will ultimately pave the way for thin-film solar cells with efficiencies of up to 30%.

// Röntgen-Diffraktogramme von Kesterit-Mischsystemen $\text{Cu}_2\text{ZnGe}(\text{S,Se})_4$: Die Peakposition korreliert mit dem Schwefelgehalt und der Bandlücke.
// X-ray diffractograms of kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnGe}(\text{S,Se})_4$ mixed systems: the peak position correlates with the sulphur content and the bandgap.

Hochband-Kesterit-Solarzellen
High bandgap kesterite solar cells
// Dr. Thomas Schnabel
E-mail: thomas.schnabel@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-339

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

// Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)



// Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung der Qualität und Stabilität von Photovoltaik-Modulen (PV-Modulen) sowie der effiziente Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder des Fachgebiets und seiner Kunden. Auf der Basis von 30 Jahren Test Erfahrung mit PV-Modulen aus kristallinem Silizium (c-Si) und aus Dünnschichtmaterialien werden im Modultestlabor Solab Untersuchungen zum Energieertrag sowie zur Langzeitstabilität von PV-Modulen und -Systemen durchgeführt. Für die Charakterisierung der Modulstabilität werden Resultate aus beschleunigten Alterungstests im Labor mit der hochaufgelösten Bestimmung von Degradationseffekten unter realen Betriebsbedingungen auf dem Freiland-Testfeld Widderstall des ZSW korreliert. Spezialuntersuchungen zur potenzialinduzierten Leistungsdegradation (PID) und zur Stabilität der Rückseitenfolien von Solarmodulen sind ebenso Beispiele für Forschungsthemen und angebotene Dienstleistungen wie die Systemberatung zur gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV).

Zu unserer Beratungskompetenz gehören neben der Qualitätskontrolle von PV-Modulen und der Wirkanalyse von Störfaktoren (Klima, mechanische Belastung, Verschmutzung, elektrische Spannung) die Prüfungen („Due Diligence“) von PV-Großanlagen und von PV-Produktionsstätten im Auftrag finanzierender Banken, von Projektierern oder Betreibern.

Photovoltaiksysteme tragen wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung bei. Die geeignete Verknüpfung mit elektrischen Speichern und die Kopplung der Sektoren Strom, Mobilität und Wärme 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. Die Wissenschaftler beraten bei der Entwicklung und dem Test entsprechender Algorithmen und Geräte.



„Gespeist von der Sonne, liefert die Photovoltaik weltweit Strom zur Verteilung über Netze oder als lokale Quelle. Wir kümmern uns um die Zuverlässigkeit der Solarmodule und die effiziente Nutzung von Solarstrom in Energiesystemen.“

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

// Our main focus

The two main topics of the research department and its clients are concerned with the quality and stability of photovoltaic (PV) modules as well as the efficient utilisation of solar power in the energy system. Based on 30 years of testing experience with PV modules made of crystalline silicon (c-Si) and thin-film materials, investigations into the energy yield and long-term stability of PV modules and systems are conducted in the Solab module test laboratory. In order to characterise the module stability, results from accelerated ageing tests in the laboratory are correlated with the high-resolution determination of degradation effects under actual operating conditions at ZSW's Widderstall outdoor testing facility. Other research topics and offered services include special investigations into potential-induced power degradation (PID) and the stability of backsheets for solar modules as well as advising on systems for building-integrated photovoltaics (BIPV).

Besides controlling the quality of PV modules and analysing the impact of interference factors (climate, mechanical loads, soiling and electrical voltage), our consultancy expertise also includes inspections of large-scale PV installations and PV production facilities on behalf of financing banks, project developers and operators (“due diligence”).

Photovoltaic systems make a significant contribution to sustainable power generation. The appropriate combination with electrical storage systems and the coupling of the power, mobility and heat sectors all increase the local use of solar power, relieve the distribution networks and contribute to decentralised balancing of generation and consumption. The analysis of the corresponding potentials as well as the development of algorithms for the optimised operation of generators, storage systems and loads, including suitable charging management for electromobility, are therefore further topics addressed by the research department. The scientists advise on the development and testing of corresponding algorithms and devices.

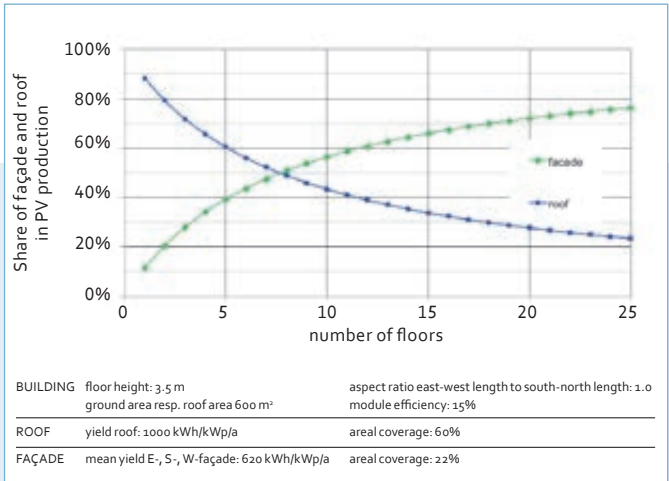
“Tapping the sun, photovoltaics delivers electricity worldwide into grids and as a local source. We ensure the reliability of the solar modules and the efficient integration of solar energy into customer networks.”

// Fassadenintegrierte Photovoltaik-Systeme in CIGS-Technologie

Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojekts „Fassadenintegrierte Photovoltaik-Systeme“ werden unter anderem die Eigenschaften von gebäudeintegrierter Photovoltaik (BIPV), speziell von CIGS-Fassadensystemen, im Vergleich zu PV-Dachanlagen untersucht.

Ein begrenzender Faktor für den Einsatz von PV-Dachanlagen bei Industrie- und Verwaltungsgebäuden ist der Wettbewerb mit gebäudetechnischen Einrichtungen wie Wärmetauschern, lufttechnischen Anlagen oder auch solarthermischen Kollektoren, welche als schattenwerfende Elemente die Dachfläche fragmentieren. Darüber hinaus kann aber auch eine konkurrierende Nutzung als begehbarer Dachgarten oder für eine lokal vorgeschriebene extensive Dachbegrünung vorliegen. Oft ist insbesondere auf Hallen die Realisierung einer PV-Dachanlage wegen Überschreitung der zulässigen Flächenlast nicht möglich. Zudem sinkt mit zunehmender Stockwerkszahl der Anteil der PV-Dachanlage an der Deckung des Strombedarfs des Gebäudes, da sich die erzeugte Energie auf immer mehr Stockwerke verteilt.

Dagegen bietet der Einsatz von PV in der Fassade eine Reihe von Vorteilen: Aufgrund der Orientierung der PV-Anlagen kommt es zu einer Verstärkung der Energieproduktion. Die PV-Dach-typische Mittagsspitze entfällt und der Eigenverbrauchsanteil steigt, auch in den Morgen- und Abendstunden sowie im Winterhalbjahr. Eine Fassadenanlage ist also zugleich netzdienlich und vorteilhaft für den Anlagennutzer. Außerdem wächst die PV-Fassadenanlage mit steigender Stockwerkshöhe mit (siehe Abb. unten).



// Auf Dächern von Industrie- und Verwaltungsgebäuden bleibt neben den gebäudetechnischen Einrichtungen oftmals wenig Platz für eine Photovoltaikanlage.
// Technical installations on the roofs of industrial or administrative buildings often leave little space for photovoltaic systems.

// Façade-integrated photovoltaic systems with CIGS technology

As part of the “Façade-integrated photovoltaic systems” research project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, the properties of building-integrated photovoltaics (BIPV), especially CIGS façades, are being investigated in comparison to PV rooftop systems.

A limiting factor for using PV rooftop systems on industrial and administrative buildings is that the roof surface is also needed for building infrastructure equipment – such as heat exchangers, ventilation systems or solar thermal collectors, which fragment the roof surface as shading elements. In addition, there may be competing use as an accessible roof garden or for locally prescribed extensive roof greening. It is often not possible to realise PV rooftop systems on halls or warehouses because the permissible area load is exceeded. In addition, the PV rooftop system’s share in covering the building’s energy requirement decreases as the number of floors increases, as the energy generated is distributed over more and more floors.

In contrast, the use of PV in façades offers several advantages: the orientation of the PV systems stabilises the energy production over the course of a day. The typical midday peak generated by PV rooftop systems is eliminated and thus the proportion of self-consumed electricity increases by including power generated during the morning and evening hours as well as in the winter half-year. Façade systems are therefore both grid-supportive and advantageous for system users. In addition, the PV façade system grows in proportion to the number of storeys (see graph below).

// Anteil von PV-Fassade und -Dach an der gesamten PV-Energie in Abhängigkeit von der Stockwerkszahl des Gebäudes (Durchschnittswerte für Süddeutschland).
// Share of PV energy supplied by PV façade and PV rooftop systems as a function of the number of storeys in the building (mean values for southern Germany).

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

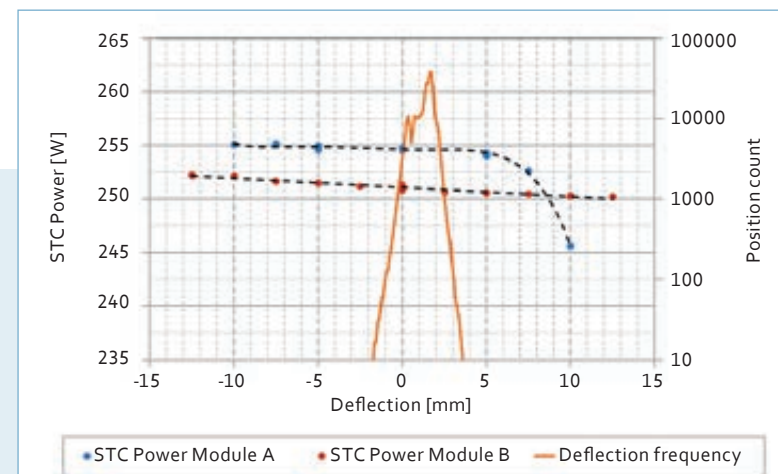


// ZSW-Testfeld Widderstall.
// ZSW's Widderstall testing facility.

// Wirkung wechselnder mechanischer Belastungen auf Solarmodule aus kristallinem Silizium

Die Auswirkungen von wechselnden mechanischen Belastungen, die auf PV-Module im Feld beispielsweise durch Winddruck ausgeübt werden, werden aktuell hinsichtlich der Zuverlässigkeit sowie möglicher Ertragsseinbußen diskutiert. Dies geschieht auch im Hinblick darauf, dass PV-Module mit Zellen aus kristallinem Silizium in manchen Fällen Mikrorisse aufweisen bzw. entwickeln können.

An c-Si-PV-Modulen, die auf dem ZSW-Testfeld Widderstall auf festem Gestell und auf einem einachsigen Nachführsystem (Tracker) montiert waren, wurden mittels Laser-Abstandssensoren die auftretenden Schwingungen und Durchbiegungen mit hoher Auflösung der Auslenkung und Abtastintervalle aufgezeichnet. Gleichzeitig wurde die Windgeschwindigkeit am Standort registriert. Die ausgewählten Testmodule hatten initial auf Elektrolumineszenz-(EL)-Bildern einzelne Zellen mit Mikrorissen gezeigt. Die im Feld beobachteten Auslenkungen der Modulebene liegen im Bereich einiger weniger Millimeter um die Ruhelage. Dies gilt auch für die auf dem einachsigen Tracker montierten Module, bei denen sich ein Tageszyklus der Auslenkungen aufgrund der Drehung des Tragegestells mit den Windeinwirkungen überlagert. Im Labor zeigen diese Module bei mechanischer Auslenkung von bis zu ± 5 mm nur eine geringe Abhängigkeit der gemessenen STC-Leistung (s. Abb. unten). Da die im Freifeld während einer einjährigen Messperiode beobachteten Auslenkungen (Intervall von ± 4 mm) unterhalb dieser kritischen Schwelle liegen, kann gefolgert werden, dass im Feldbetrieb keine relevanten Leistungs- bzw. Ertragsminderungen an durch Mikrorisse geschädigten Modulen auftreten.



// Effect of changing mechanical loads on solar modules made of crystalline silicon

The effects of changing mechanical loads exerted on PV modules in field conditions, for example by wind pressure, are currently being discussed in regard to their reliability as well as possible yield losses. This is also in view of the fact that PV modules with cells made of crystalline silicon may show or develop microcracks in some cases.

The oscillations and deflections that occurred on c-Si PV modules mounted on a fixed rack and on a uniaxial tracker at ZSW's Widderstall outdoor testing facility were recorded by means of laser displacement sensors with high-resolution deflection and scanning intervals. At the same time, the wind speed was also recorded at the location. The modules selected for testing were shown to have individual cells with microcracks by electroluminescence (EL) imaging. The deflections of the module plane observed in the field investigation are in the range of a few millimetres around the rest position. This also applies to modules mounted on the uniaxial tracker, where a daily cycle of deflections caused by the rotation of the support frame is superimposed on the wind effects. In the laboratory, these modules show that the measured STC power is only slightly dependent on mechanical deflections of up to ± 5 mm (see figure below). Since the deflections (± 4 mm intervals) observed in the field investigation during a one-year measuring period are below this critical threshold, it can be concluded that no relevant performance or yield reductions occur in modules damaged by microcracks during field operation.

// Leistung von zwei c-Si-Modulen unter Standard-Testbedingungen mit vorgeschädigten Zellen bei verschiedenen Auslenkungen der Modulebene (+: Druck; -: Sog) zusammen mit einer Häufigkeitsverteilung der im Freifeld real vorkommenden Auslenkungen.
// Power of two c-Si modules under standard test conditions with pre-cracked cells at various deflections of the module plane (+: pressure; -: suction) together with the frequency distribution of deflections observed in the field investigation.

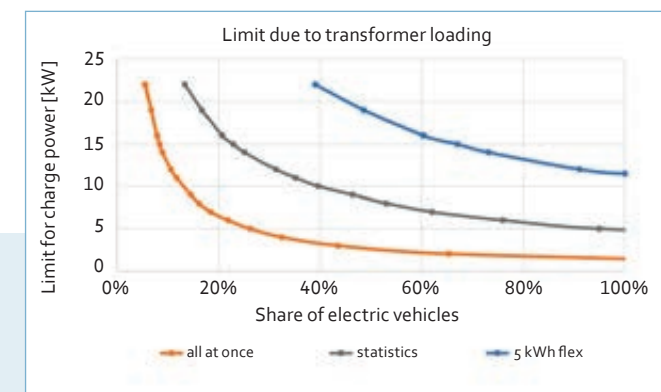
// Dipl.-Phys. Dirk Stellbogen
E-mail: dirk.stellbogen@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-221



// Elektromobilität mit erneuerbarem Strom muss das Netz kaum belasten

Elektromobilität bietet die Option, dezentral – also zu Hause oder beim Arbeitgeber – laden zu können, und nicht nur an einer öffentlichen Tankstelle. Die Flexibilität durch die lange Standzeit bis zur Weiterfahrt gilt es für das Stromnetz zu nutzen.

Die Bilder unten zeigen am Beispiel eines Leitungsstrangs mit 62 Haushalten in einem ländlichen Wohngebiet für den Fall „all at once“ in Abhängigkeit des Anteils an Elektroautos, wie stark die Ladeleistung reduziert werden müsste, wenn alle an einem Netzstrang vorhandenen Fahrzeuge gleichzeitig laden, um einerseits den Transformator nicht zu überlasten (Abb. links unten) und andererseits den zusätzlichen Spannungsabfall am Strang nicht über 5 % steigen zu lassen (Abb. rechts unten). Bei einer Häufung von weniger Ladestationen am Ende des Strangs wird der Spannungsabfall erhöht und die erlaubte Ladeleistung weiter reduziert. Berücksichtigt man die Verteilung der Ankunftszeiten und die durchschnittlich gefahrene Wegstrecke von nur 50 km in Deutschland, ergibt sich bei der Kurve „statistics“ in 99,7% aller betrachteten Fälle eine rund doppelt so hohe erlaubte Ladeleistung. Wird jeder Ladepunkt mit einer stationären Batterie ausgerüstet, sodass die ersten 5 kWh des Ladebedarfs aus der Batterie gedeckt werden, kann die erlaubte Ladeleistung deutlich steigen, bevor die Leistungs- und Spannungsgrenzen im Netz verletzt werden. Das Gleiche gilt, wenn der Kunde bereit ist, 5 kWh seines Ladebedarfs (entspricht einer Strecke von rund 25 km) auf einen Zeitraum zu verschieben, in dem das Netz weniger ausgelastet ist („5 kWh Flex“). Intelligentes Lastmanagement kann nicht nur das Netz entlasten, sondern auch den Ladebedarf entsprechend dem Angebot an Strom aus Wind und Sonne decken.

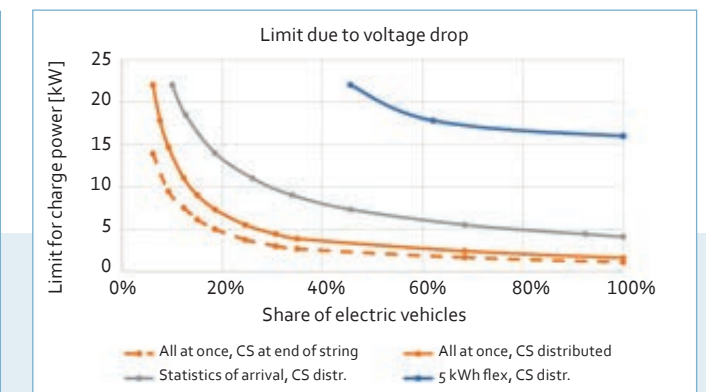


// Erlaubte Ladeleistung zur Einhaltung der Leistungsgrenze des Transformators (links) und des zugelassenen Spannungsabfalls im Strang (rechts) als Funktion des Anteils an Elektroautos und in Abhängigkeit der Verteilung der Ladestationen (CS) im Strang.
// Limit of charge power imposed by transformer loading (left) and the voltage drop (right) as a function of the share of electric vehicles and the location of the charging stations (CS).

// Electromobility with renewable electricity has hardly any impact on the electricity grid

Electromobility offers the option of charging locally – for instance at home or at work – and not just at a public filling station. The goal is to take advantage of the flexibility offered by the long idle period before further travelling.

The graphs below show, with the example of a string with 62 households in a rural residential area, the limit for charging power relative to the share of electric vehicles for different cases, like the „all at once“ case when all the vehicles on a grid string charge at the same time. The limits are to prevent the transformer from overloading (see fig. bottom left) and the additional voltage drop on the string from rising above 5% (see fig. bottom right). If fewer charging stations accumulate at the end of the string, the voltage drop is increased and the limit for charging power is further reduced. Taking into account the distribution of arrival times and the fact that the average distance travelled in Germany is only 50 km, the „statistics“ curve shows that the limit for charge power is about twice as high in 99.7% of all considered cases. If each charging point is equipped with a stationary battery so that the first 5 kWh of the charging requirement is met by the battery, the limit for the charge power can increase significantly before the power and voltage limits in the grid are exceeded. The same applies if customers are prepared to shift 5 kWh of their charging requirement (corresponds to a distance of around 25 km) to a time period when the grid is less utilised („5 kWh flex“). Intelligent load management can not only relieve the load on the grid but can also align charging periods with the amount of electricity supplied by the wind and sun.



// Joel Wenske
E-mail: joel.wenske@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-354

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

// Unsere Kernkompetenzen

Leitmotiv des Fachgebiets Regenerative Energieträger und Verfahren ist die Erzeugung regenerativer Brenn- und Kraftstoffe – mit der Kernkompetenz, erneuerbare Energie effizient in leicht transportable, „tankbare“ chemische Energieträger zu überführen und zu speichern.

Im Fachgebiet werden neue Technologien zur Herstellung von Wasserstoff, Synthesegas und Erdgassubstitut (SNG) entwickelt und im technischen Maßstab bis zu mehreren 100 kW erprobt. Neben der Elektrolyse, der Brennstoffreformierung und der Erzeugung strombasierter und biomassebasierter Synthesegase sind die Gasreinigung, die Gaskonditionierung sowie die Kraftstoffsynthese wichtige Aufgabengebiete.

Zielsetzung im Themenfeld alkalische Elektrolyse ist insbesondere die Weiterentwicklung des Elektrolyseblocks und die Kostenreduktion der gesamten Wasserstoffherstellungsanlage durch Modularisierung der Systemkomponenten. Zielsetzung bei der Gasprozess-technik ist die Erzeugung eines brennstoffzellentauglichen Gases, eines Brenngases für die Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstofferzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

Es wurden bereits zwei Power-to-Gas-Anlagen in den Leistungsklassen 25 kW_{el} und 250 kW_{el} am ZSW aufgebaut. An einer Anlage mit 6.000 kW_{el} war das ZSW im Rahmen des Basic Engineerings sowie der Inbetriebnahme beteiligt und führt seither das Anlagenmonitoring durch.

Eine Anlage in der Leistungsklasse von 1.000 kW_{el} wurde im Jahr 2018 im Rahmen des vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Leuchtturmprojektes „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ eingeweiht.



„Ohne regenerative strombasierte Kraftstoffe (E-Fuels) wird die Energiewende nicht gelingen.“

// Dr. Michael Specht, Head of Department
E-mail: michael.specht@zsw-bw.de, phone: +49 711 7870-218

// Our main focus

The primary focus of the Renewable Fuels and Processes department is the production of renewable fuels, including motor fuels – with the core competency of efficiently transferring renewable energy and storing it in easily transportable chemical fuels that allow vehicles to be refuelled in a practical manner.

The department develops new technologies for the production of hydrogen, synthesis gas and substitute natural gas (SNG) and tests these on a pilot scale of up to several hundred kilowatts. Alongside electrolysis, fuel reforming and the production of synthesis gas based on both biomass and electricity, our activities also focus on gas purification and conditioning and fuel synthesis.

Particular objectives in the field of alkaline electrolysis are the development of electrolysis blocks and cost reduction for overall hydrogen generation systems by means of system component modularisation. Our aims in the area of gas processing technology are to produce a suitable gas for fuel cells, fuel gas for electricity generation, conditioned synthesis gas for fuel production and substitute natural gas to be distributed through the natural gas grid.

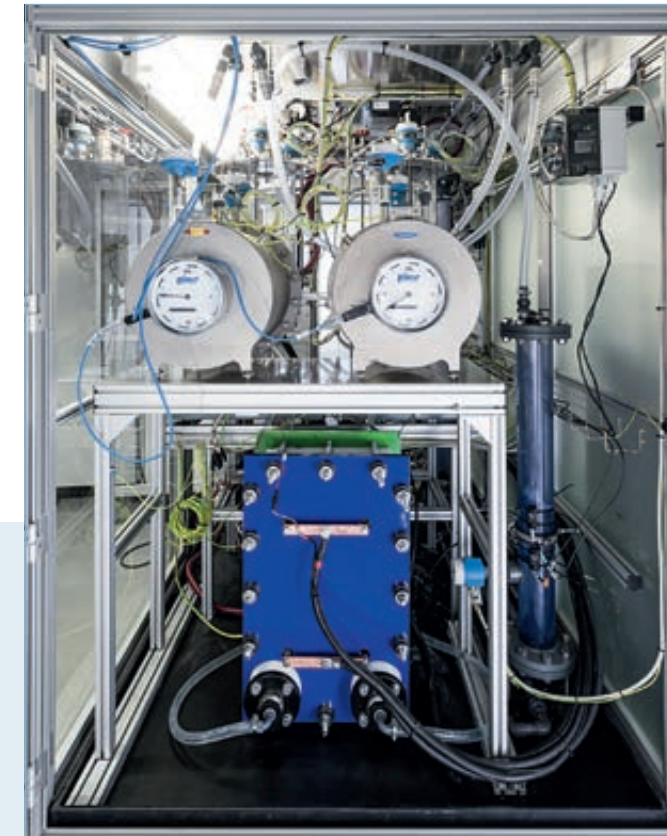
Two power-to-gas plants have already been built at ZSW in the 25 kW_{el} and 250 kW_{el} power classes. ZSW was also involved in basic engineering and commissioning of a 6,000 kW_{el} plant and has since been carrying out associated plant monitoring.

A further system in the 1,000 kW_{el} power class was inaugurated in 2018 as part of the “Power-to-Gas Baden-Württemberg” flagship project funded by the Baden-Württemberg Ministry for Economic Affairs.



// 100-kW-Elektrolyse-Container nimmt Betrieb auf

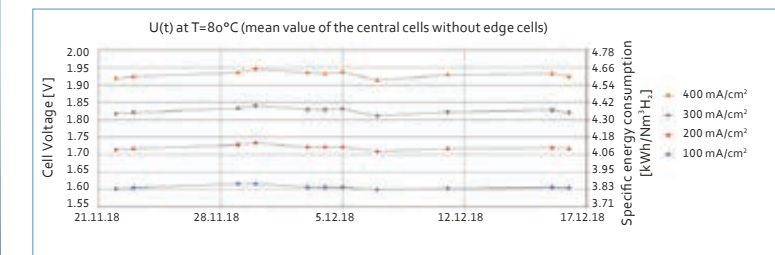
Ziel des Projektes ecoPtG ist die Entwicklung einer effizienten und wirtschaftlichen alkalischen Elektrolyse (AEL) für die Anwendung des erzeugten Wasserstoffs im Mobilitäts- und Off-Grid-Bereich. Zusammen mit Industriepartnern wurden Möglichkeiten des Technologietransfers aus der Serienfertigung der Automobilindustrie zur Realisierung eines containerbasierten Low-cost-Elektrolysesystems der 100-kW-Klasse untersucht und umgesetzt. Im Fokus standen dabei die Leistungselektronik, Steuerung und Sensorik sowie verfahrenstechnische Komponenten, etwa für die Temperierung und die Medienkreisläufe. Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekts entstand ein containerbasierter 100-kW-Demonstrator, welcher Ende 2018 in Betrieb genommen wurde. Die beiden darin verwendeten 50-kW-Elektrolyse-Blöcke wurden am ZSW entwickelt und aufgebaut. Für die Inbetriebnahme der Blöcke wurden die erforderlichen Aktivierungsbedingungen untersucht und durch Materialanalysen begleitet. Im Zuge der 100-kW-Blockentwicklung wurde ein 10-kW-Demonstrator am ZSW aufgebaut und betrieben (Versuchsergebnisse siehe Grafik).



// 50-kW-AEL-Block für Containerbetrieb.
// 50 kW AEL block for container operation.

// 100 kW electrolysis container begins operation

The aim of the ecoPtG project is to develop efficient and economical alkaline electrolysis (AEL) systems to generate hydrogen for use in the mobility and off-grid sectors. Together with industry partners, possibilities offered by technology transfer from series production in the automotive industry were examined and implemented to produce a container-based low-cost electrolysis system in the 100 kW class. The focus here was on power electronics, control and sensor technology and production process components for temperature control and fluid circuits, for example. The project saw the creation of a container-based 100 kW demonstrator that was put into operation at the end of 2018. The two 50 kW electrolysis blocks used in the system were developed and built at ZSW. For the commissioning of the blocks, the necessary activation conditions were examined and accompanied by material analyses. In the course of developing the 100 kW block, a 10 kW demonstrator was built and operated at ZSW (see graph for test results).



// Zellspannung und spezifischer Energieverbrauch des 10-kW-Demonstrators bei verschiedenen Lastpunkten.
// Cell voltage and specific energy consumption of 10kW demonstrator at different operating points.

// Versuchssystem mit 10 kW alkalischer Elektrolyse.
// Test system with 10 kW alkaline electrolysis capacity.

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



// CO₂ und Hochtemperaturwärme durch Biomasse-OxyFuel-Verbrennung für die Hochtemperaturelektrolyse

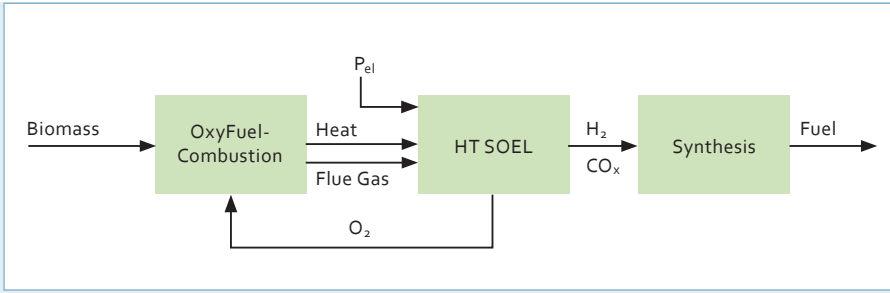
Durch die Kombination von Hochtemperaturelektrolyse (HT-SOEL, High Temperature Solid Oxide Electrolysis) und OxyFuel-Verbrennung können erneuerbare kohlenstoffbasierte PtX-Kraftstoffe und Chemikalien mit einem Strombedarf von 2,5 kWh_{el}/mN³_{SynGas} hergestellt werden. Die grundlegende technische Innovation besteht darin, dass der Sauerstoffbedarf des OxyFuel-Prozesses von der HT-SOEL gedeckt und die aus der Verbrennung von Biomasse entstehende Hochtemperaturwärme in die HT-SOEL eingekoppelt wird. Die HT-SOEL wird im endothermen Modus betrieben, sodass hochwertiger Strom durch Wärme ersetzt werden kann. Durch die OxyFuel-Verbrennung fungiert die Biomasse auch als CO₂-Quelle für PtX-Prozesse.

Im Rahmen des Kopernikus-Verbundvorhabens des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X“-Konzepten hat das ZSW einen 10-kW_{th}-Biomasse-OxyFuel-Teststand für die Erzeugung von CO₂-Wasserdampf und Hochtemperaturwärme in Betrieb genommen. Erste Vorversuche zur Oxyfuel-Verbrennung von Erdgas in einem 1-kW_{th}-FLOX-Brenner lieferten ein Abgas mit knapp 99 % CO₂, das als Ausgangsstoff für die HT-SOEL geeignet ist. Parallel wurde der neue PtX-Pfad mithilfe von Prozess-Simulationen bewertet und für ein derart erzeugtes erneuerbares Erdgassubstitut eine Effizienz von rund 65 % ermittelt (bezogen auf den Biomasse- und Strom-Input). Dabei kann der Kohlenstoff der Biomasse vollständig in das erneuerbare Zielprodukt überführt werden, was einer Erhöhung des Kraftstofftrags gegenüber bisherigen Biokraftstoffen, wie Bio-Diesel oder Bio-Ethanol, um das mehr als Fünffache, bezogen auf die Anbaufläche und den Kraftstoff-ertrag je Hektar, entspricht.

// CO₂ and high-temperature heat from biomass OxyFuel combustion for high temperature electrolysis

Through the combination of high-temperature electrolysis (HT-SOEL, High Temperature Solid Oxide Electrolysis) and OxyFuel combustion, renewable, carbon-based PtX fuels and chemicals with a power consumption of 2.5 kWh_{el}/mN³_{SynGas} can be produced. The fundamental technical innovation involves meeting the oxygen requirement of the OxyFuel process by HT-SOEL and coupling the high temperature heat produced from the combustion of biomass into HT-SOEL. HT-SOEL is operated in endothermic mode, meaning that high cost electricity can be replaced by thermal energy. Through OxyFuel combustion, biomass also functions as a CO₂ source for PtX processes.

As part of the Kopernikus joint research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research "P2X: Research, Validation and Implementation of 'Power-to-X' Concepts", ZSW has built and commissioned a 10 kW biomass OxyFuel test rig for generating CO₂, water vapour and high temperature heat. Initial pilot tests for OxyFuel combustion of natural gas in a 1 kW_{th} FLOX burner delivered waste gas at just under 99% CO₂, which is suitable as a source material for HT-SOEL. The new PtX path was assessed in parallel using process simulations, and an efficiency of approx. 65% was determined for a renewable natural gas substitute produced in this fashion (based on biomass and power input). The carbon of the biomass can be carried over entirely into the renewable target product in this process, corresponding to a more than fivefold increase in the fuel yield as compared to previous biofuels such as biodiesel and bioethanol, based on the cultivated area and fuel yield per hectare.



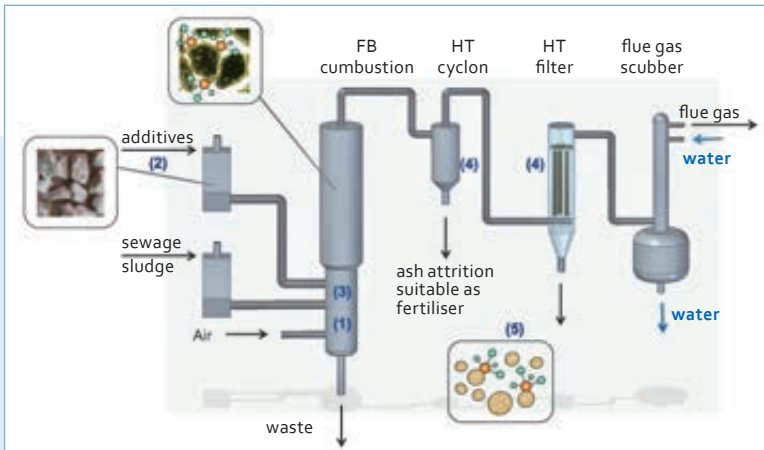
// Blockschaltbild zur Kombination von OxyFuel-Verbrennung und HT-SOEL für Kraftstoff-/Chemikalien-Synthese.
 // Block diagram for combining OxyFuel combustion and HT-SOEL for fuel/chemical synthesis.
 // Dr. Jochen Brellochs
 E-mail: jochen.brellochs@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-211

// Klärschlammverwertung mit prozess-integrierter Phosphor-Rückgewinnung: Das P-XTRACT-Verfahren

Klärschlamm wird in Deutschland überwiegend thermisch entsorgt, wobei wichtige Nährstoffe wie Phosphor (P) meist zusammen mit Schadstoffen in der Asche wiederzufinden sind und derzeit nicht wirtschaftlich zurückgewonnen werden können.

Vor diesem Hintergrund wurde am ZSW gemeinsam mit einem Industriepartner ein neues Verfahrenskonzept zur Verbrennung von Klärschlamm im Wirbelschicht-(WS-)Prozess entwickelt, das eine Phosphor-Rückgewinnung vorsieht (s. Abb. unten). Mithilfe eines Kalziumoxid-haltigen Wirbelbettmaterials soll Phosphor bereits im Verbrennungsschritt als Kalziumphosphat gebunden werden. Durch Stöße der Partikel im Prozess untereinander und mit der Reaktorwand wird ein P-haltiger Feinabrieb erzeugt. Dieser wird in einer Heißgasreinigung (z. B. mittels Kerzenfilter) aus dem Rauchgasstrom abgetrennt. Da Schadstoffe bei den dort herrschenden Temperaturen gasförmig sind, kann ein nahezu schadstofffreier, P-angereicherter Wertstoffstrom gewonnen werden, der als Dünger oder Düngierzusatzstoff in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann.

Ein erster Machbarkeitsnachweis zur P-Anreicherung im Austrag eines Laborwirbelschichtreaktors ist am ZSW erfolgt und das neue Verfahrenskonzept soll ab 2019 untersucht werden. Neben dem Nachweis der generellen Machbarkeit des Verfahrens sollen die Betriebsbedingungen in der Wirbelschicht und der Heißgas-Partikelabtrennung optimiert werden. Ziele sind eine hohe P-Rückgewinnung und ein düngemittelgeeignetes Wertprodukt, wodurch das Verfahren zu einer nachhaltigen Klärschlammverwertung und Nährstoff-Versorgung beiträgt.



// Das Verfahrensprinzip der Klärschlammverbrennung im Wirbelschicht(WS)-Reaktor mit Phosphor-Rückgewinnung.
 // Technical principle of sewage combustion in the fluidised layer reactor with phosphorus recovery.
 // 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 der Arbeiten des Fachgebiets ECM liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren. Kernkompetenz ist die Entwicklung maßgeschneiderter Pulver und Pasten. 30 Jahre Materialforschung bilden die Basis für das umfangreiche Verständnis der Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien (wie 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.

Das ZSW ist Partner im gemeinsam mit dem KIT und der Universität Ulm gegründeten virtuellen Zentrum für zukünftige Energiespeicher CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe). CELEST ist die deutsche Forschungs- und Entwicklungsplattform für zukünftige Energiespeicher, aus der das Exzellenzcluster POLiS (Post Lithium Storage) hervorgegangen ist. Hierbei geht es um neue Speicher mit Magnesium oder Natrium.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Entwicklung von Batteriezellen im Format 18650, 21700 sowie Single-Layer- und gestapelte Pouch-Zellen. Hier stehen neue Fertigungsprozesse für leistungsfähigere Komponenten für zukünftige Lithium-Zellgenerationen im Zentrum. Prototypen im Format 18650 und 21700 mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Zyklenstabilität. 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 Zelldesignoptimierung.

// Our main focus

The ECM research department's work traditionally focuses 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.

ZSW is a partner institution of the virtual centre for future energy storage CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe). CELEST was founded together with KIT and Ulm University. It is the German research and development platform for future energy storage, where the POLiS (Post Lithium Storage) has its origins. Research involves new storage systems with magnesium or sodium.

Further 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. Prototypes in the 18650 and 21700 formats with self-developed electrodes exhibit very high reproducibility and cycle stability. For analysing damage and assessing new cells, the department is specialised in post-mortem analyses. These are essential for understanding ageing processes and potential safety risks and for optimising cell design.

// Post-Lithium-Ionen-Batterien

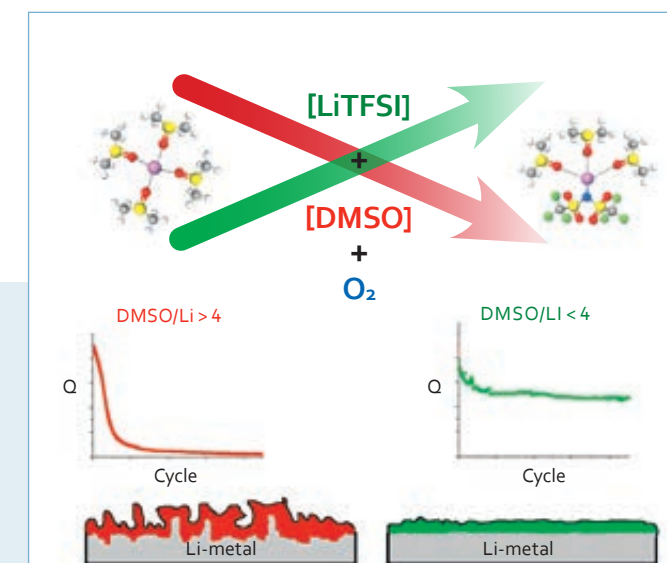
Lithium-Ionen-Batterien sind die weltweit führende Batterietechnologie. Mit der steigenden Nachfrage nach höheren Wirkungsgraden entwickelt sich die Batterieforschung gegenwärtig Richtung neue Speichersysteme, die eine höhere Energiedichte bei geringeren Kosten versprechen und unkritische Materialien einsetzen. Im Rahmen von drei Forschungsprojekten, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert werden, arbeitet das ZSW derzeit an diversifizierten chemischen Zellstrukturen. Das primäre Ziel ist es, das Potenzial von Metall-Luft-Batterien zu erschließen, die auf einwertigen und zweiwertigen Kationen basieren.

Im Zusammenhang mit Lithium-Luft-Batteriezellen, bei denen flüssige, aprotische Elektrolyte zum Einsatz kommen, finden die Reaktionen der Sauerstoffreduktion und -entstehung (ORR/OER) während des Entlade- und Ladevorgangs auf der Kathodenseite statt. Bei diesem Vorgang werden zwei Elektronen hinzugefügt und Lithium-Peroxide (Li_2O_2) gelöst. Auf der Anodenseite wird von einer Lithium-Metallabscheidung/-auflösung ausgegangen. Unerwünschte Nebeneffekte entstehen jedoch häufig durch die nachträgliche Bildung von Nebenprodukten, die die Batterieleistung einschränken. Am ZSW konnten Wissenschaftler die Alkalimetall-/Elektrolytschnittstelle durch die Verwendung hochkonzentrierter Elektrolyte, die auf Dimethylsulfoxid (DMSO) basieren, erfolgreich stabilisieren. So konnte das Verhalten der Lithium-Metallabscheidung/-auflösung erheblich verbessert werden (s. Abb. unten).

// Post lithium-ion batteries

Lithium-ion is undoubtedly the world-leading battery technology. However, the increasing demand for batteries with higher performances is driving the research toward so-called post lithium-ion batteries, which promise higher energies at lower costs and the use of non-critical materials. The ZSW is currently working on diversified cell chemistries within the framework of three research projects sponsored by the German Federal Ministry of Education and Research. The primary objective is to unveil the potential of metal-air batteries based on monovalent as well as divalent cations.

In the context of Li-air battery cells that use liquid aprotic electrolytes, during the discharge and charge process, oxygen reduction and evolution reactions (ORR/OER) take place at the cathode side. The process involves bringing two electrons the formation and dissolution of lithium peroxides (Li_2O_2). At the anode side only, Li metal stripping/plating is expected. However, unwanted side reactions are often observed with consequent formation of by-products that limit the battery performance. At ZSW, researchers successfully stabilised the alkali metal/electrolyte interface by using highly concentrated electrolytes based on dimethyl sulfoxide (DMSO) thus remarkably improving the Li stripping/plating behavior (see fig. below).



// Hoch konzentrierte Elektrolyte, die auf Dimethylsulfoxid (DMSO) basieren, führen zu einer erheblichen Verbesserung beim Verhalten der Lithium-Metallabscheidung/-auflösung.
// Highly concentrated electrolytes based on dimethyl sulfoxide (DMSO) remarkably improve the Li stripping/plating behavior.

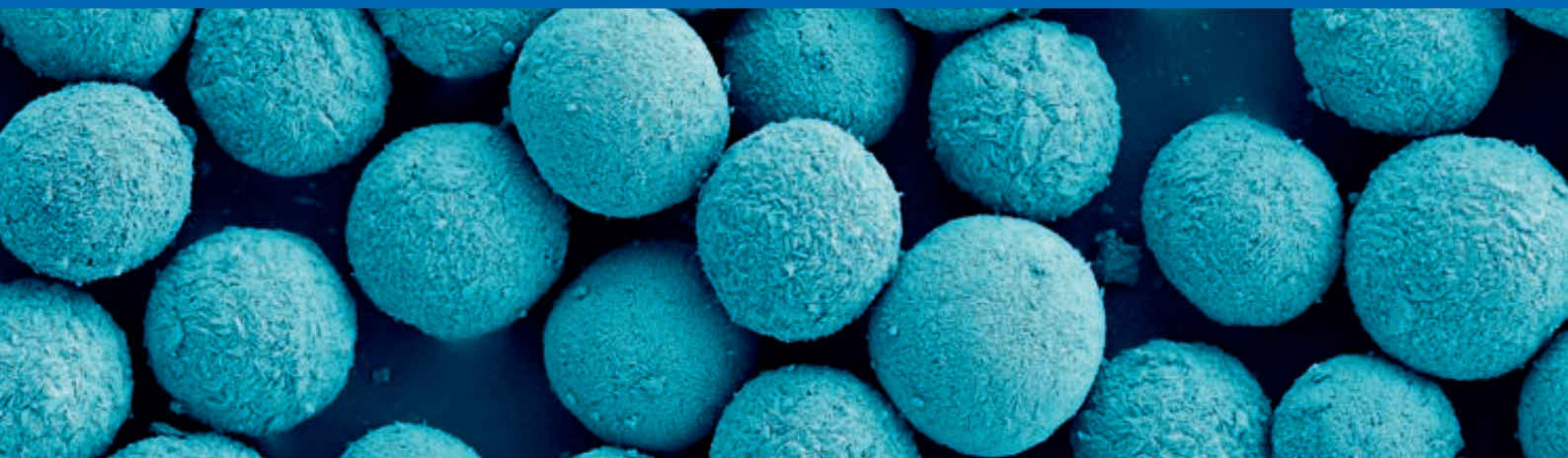
// Dr. Mario Marinaro
E-mail: mario.marinaro@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-213



„E-Mobilität und erneuerbare Energien erfordern neue Energiespeichersysteme. Wir bilden die komplette Wertschöpfungskette vom Pulver bis zur fertigen Batteriezelle ab und können damit einen wichtigen Beitrag leisten.“

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

“E-mobility and renewable energies require new energy storage systems. We provide the complete value chain from the powder to the finished battery cell. In doing so, we are able to make an important contribution.”



// REM-Aufnahme eines kobaltfreien Hochenergie-Kathodenmaterials für Lithium-Ionen-Batterien.
 // SEM imaging of a cobalt-free high-energy cathode material for lithium-ion batteries.

// Kobaltfreie Kathodenmaterialien

Der schnell wachsende Bedarf an großen Lithium-Ionen-Zellen für die Elektromobilität führt zu einem entsprechenden Bedarf an Materialien, deren Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit sichergestellt sein muss. Für Hochenergiebatterien werden als Kathodenmaterial Schichtoxide der Klasse $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ in unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt, die zwischen 10 und 33 Molprozent Kobalt enthalten. Die Versorgungssicherheit mit Kobalt wird inzwischen von der Europäischen Union als kritisch eingestuft.

Die im Projekt LiEcoSafe entwickelten Kathodenmaterialien sind nicht nur kobaltfrei, sondern erfordern auch signifikant geringere Mengen an Nickel. Die entwickelten Materialien zeichnen sich durch sehr hohe Kapazitäten bis zu 250 mAh/g und eine nachgewiesene exzellente Zyklenstabilität in Vollzellen aus. Um das Material im Hinblick auf die Anwendungen weiterzuentwickeln, ist es notwendig, die Untersuchungen in größeren Lithium-Ionen-Zellen zu intensivieren. Für die Entwicklung optimierter Elektrodenbeschichtungen werden mehrere Kilogramm Aktivmaterial benötigt. Im Fokus liegt daher die Entwicklung einer skalierbaren Synthese bis in den 10-kg-Maßstab. Im Rahmen des Projekts wurden deshalb neue Anlagen zur kontinuierlichen Fällung von Zwischenprodukten im Kilogrammmaßstab beschafft und in Betrieb genommen (siehe Abb. unten). Erste Versuche zur Übertragung der im Labormaßstab erprobten Syntheseverfahren für kobaltfreie Kathodenmaterialien auf die neuen größeren Reaktoren waren erfolgreich.



// Synthesereaktor für Fällungen bis in den 10-kg-Maßstab.
 // Synthesis reactor for precipitation to 10 kg scale.

// Cobalt-free cathode materials

Rapidly growing demand for large lithium-ion cells for e-mobility is also leading to an upsurge in demand for their associated materials, whereby the supply security and environmental compatibility of these warrants safeguarding. For high-energy batteries, the cathode material consists of layered oxides in the $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ class that have different compositions containing between 10 and 33 mole per cent cobalt. The supply security of cobalt is now considered by the European Union to be critical.

The cathode materials developed in the LiEcoSafe project are not just cobalt free but also require significantly reduced quantities of nickel. The developed materials demonstrate very high capacities up to 250 mAh/g and excellent and verifiable cycle stability in full cells. To refine the materials further in terms of application, it is necessary to intensify research in larger lithium-ion cells. For the development of optimised electrode coatings, several kilograms of active material are required. The focus is on developing a scalable synthesis to 10 kg scale. Within the project, new systems have been procured and put into operation for the continuous precipitation of intermediate products at kilogram scale (see fig. below). Initial trials aimed at carrying over synthesis processes tested at laboratory scale for cobalt-free cathode materials to the new larger reactors have proven successful.

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



// Steigerung der Material- und Prozess-effizienz von 21700-Rundzellen

In dem 1,5-jährigen vom Bundesministeriums für Bildung und Forschung geförderten Vorhaben „FAB4LIB“ forscht das ZSW gemeinsam mit 17 Partnern. Ziel des Projekts ist die Steigerung der Material- und Prozesseffizienz in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion über die gesamte Wertschöpfungskette sowie der Aufbau einer wirtschaftlichen Batteriezellfertigung in Deutschland.

Im Teilprojekt am ZSW wurden Rundzellen des neuen Formats 21700 hergestellt und im Test mit kommerziellen Zellen verglichen, die als Benchmark dienten. Ein Vergleich mit kommerziellen Rundzellen der Formate 18650 und 21700 zeigte, dass das neue 21700-Format bei vergleichbarer Elektrodenbeschichtungsstärke ca. 50 % mehr Energieinhalt speichern kann. Die Energiedichte wird durch den Formatwechsel jedoch nur geringfügig beeinflusst.

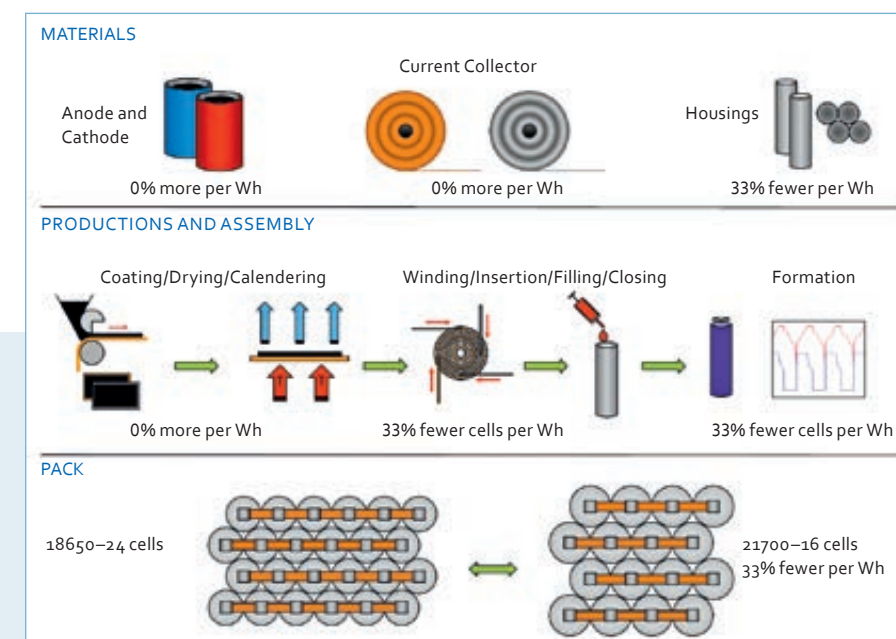
Der höhere Energieinhalt führt zu einem teilweise geringeren Aufwand bei der Produktion der 21700-Zellen (siehe Abb. unten). So müssen pro produzierter Wattstunde (Wh) ca. 33 % weniger Zellen befüllt und formiert werden, was einen positiven Effekt auf die Produktionskosten hat.

// Increased material and process efficiency with 21700 round cells

The 1.5-year “FAB4LIB” project funded by the German Federal Ministry of Education and Research involves research performed by ZSW together with 17 partners. The aim of the project is to increase material and process efficiency in lithium-ion battery cell production across the entire value chain and to establish efficient battery cell manufacturing in Germany.

In the subproject at ZSW, round cells of the new format 21700 were manufactured and compared in a test with commercial cells, which served as benchmarks. Comparison with commercial round cells in the 18650 and 21700 formats shows the new 21700 format to be capable of storing approx. 50% more energy with comparable electrode coating thickness. The energy density, however, is affected by the change in format only marginally.

The higher energy content per cell allows for partially reduced expenditure in the production of 21700 cells (see fig. below). For instance, approx. 33% fewer cells require filling and arrangement per produced watt-hour (Wh), which has a positive impact on production overheads.



// Pro produzierter Wattstunde müssen mit 21700-Zellen ca. 33% weniger Zellen befüllt und formiert werden als bei kommerziellen 18650-Zellen.
 // With 21700 cells, approx. 33% fewer cells require filling and arrangement per produced watt-hour than with commercial 18650 cells.

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

// Produktionsforschung (ECP)

Production Research (ECP)

// Unsere Kernkompetenzen

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

Im Fokus der Arbeit des Fachgebiets steht der Betrieb einer vorwettbewerblichen „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“, die den seriennahen Gesamtproduktionsprozess für Hardcase-Zellen abbildet (PHEV-1-Zellen, >25 Ah). Hierbei stehen Untersuchungen zum Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten sowie Fragen zur Inline-Sensorik, zu Fertigungstoleranzen oder zu kosteneffizienten Abläufen im Zentrum. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um die Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Maßstab.

Kernaufgabe des ECP-Teams ist es, im Rahmen von Industrieaufträgen und Forschungsvorhaben industrielle Produktionsprozesse zu optimieren oder fortschrittliche Zellchemie in Musterserien von Standardzellen zu verifizieren. Die Forschungskompetenz umfasst alle produktionsnahen Fragestellungen, von der Anlagenentwicklung über die Verbesserung von Einzelschritten bis zu den Qualitätssicherungsverfahren. Des Weiteren verfügt das Team durch den inzwischen mehrjährigen Betrieb der Pilotanlage über eine wichtige Beratungskompetenz bezüglich Zellfertigung und Kostenbetrachtungen.



„Mit der Forschungsplattform stellen wir unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft eine flexible und 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

// Our main focus

The series production of large lithium-ion cells, such as those used in electrical vehicles or stationary storage systems, places particular demands on the stability and precision of processes. The higher their quality and reproducibility, the greater the reliability, durability and cost-effectiveness of the storage systems.

The research department's work focuses on operating a pre-competition "Research platform for the industrial production of large lithium-ion cells (FPL)," which maps the near-production overall manufacturing process for hard-case cells (PHEV-1 cells, >25 Ah). The focus in this regard is on studies of the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in terms of quality, reliability and manufacturing costs as well as issues around in-line sensors, manufacturing tolerances and cost-efficient workflows. With new materials and components, the goal is to evaluate usability and quality at an industrial scale.

The main responsibility of the ECP team is to optimise industrial production processes as part of industrial orders and research projects, or verify advanced cell chemistry in sample series of standard cells. Research expertise covers all production-related aspects, from system development to improving individual steps, right up to quality assurance processes. Furthermore, the team has essential consultancy expertise around cell manufacturing and cost considerations through by now several years of experience in operating the pilot system.



// 400-m-Kathodenband (links) und prismatische PHEV-1-Zelle mit Aluminiumgehäuse (Hardcase) und Flachwickel (rechts), hergestellt an der FPL des ZSW.
// 400-m cathode band (left) and prismatic PHEV-1 cell with aluminium housing (hard case) and flat winding (right), manufactured on ZSW's FPL.

// Fortschrittliche Herstellprozesse für Lithium-Ionen-Batterien

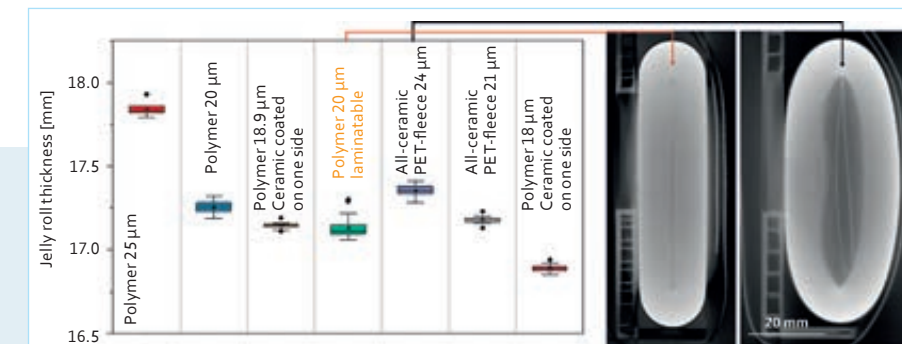
Die Geometrie und Leistung von Lithium-Ionen-Batterien (LIBs) werden signifikant durch die Elektrodenanordnung beeinflusst. Bekannte industrielle Prozesse umfassen z. B. Wickeln (rund oder prismatisch) und Z-Falten. Daneben rückt das Einzelblattstapeln immer mehr in den Fokus. Damit werden radienabhängige Nachteile wie ungleichmäßige mechanische Belastungen auf die Elektrode oder eine inhomogene Wärmeverteilung reduziert. Daraus ergibt sich ein Potenzial zur Steigerung von Leistungsdichten, Zyklenfestigkeiten, Langlebigkeit und Sicherheit. Zudem werden nicht-lineare Alterungsmechanismen, wie sie bei Wickeln auftreten, minimiert. Allerdings genügen die im Moment verfügbaren Anlagen für sehr schnelle Stapelprozesse eher Laboranforderungen als denen für die Massenfertigung.

Hier setzt das ZSW an und fokussiert zusammen mit Industriepartnern in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt STACK die Entwicklung eines ultra-schnellen „Stackers“ (engl. Stapler) zum hochpräzisen Einzelblattstapeln von Elektroden. Eine große Herausforderung ist die Biegeschlaffheit der Einzelblätter. Zur Kompensation soll ein laminierfähiger Vollkeramik-Separator auf Vliesstoffbasis entwickelt werden, der eine wichtige technische Neuerung darstellt. Erste Erfolge mit laminierfähigen Separatoren konnten mit dem „Elektroden-Wickler“ der Forschungsplattform am ZSW (FPL) erzielt werden. So zeigen die Lithium-Ionen-Zellen mit laminierfähigen Separatoren eine geringere Wickeldicke (s. Abb. unten). Dadurch können mehr Elektrodenlagen pro Zelle eingebracht und damit die Energiedichte gesteigert werden.

// Advanced manufacturing processes for lithium-ion batteries

The geometry and performance of lithium-ion batteries (LIBs) are significantly influenced by the electrode arrangement. Established industrial processes encompass coiling (round or prismatic) and Z-folding, for example. In addition, greater focus continues to shift to individual sheet stacking. Radii-dependent drawbacks such as uneven mechanical stresses on the electrode and inhomogeneous heat distribution are consequently reduced. This creates the potential to increase power densities, cyclic stabilities, longevity and safety. Furthermore, non-linear ageing mechanisms such as occur during coiling are minimised. However, systems currently available for ultra-rapid stacking processes are more sufficient so for laboratory requirements than for those in mass production.

This is where ZSW comes into play, focussing together with industry partners in the STACK project funded by the German Federal Ministry of Education and Research on developing an ultra-rapid "stacker" for the high-precision individual sheet stacking of electrodes. The flexibility of individual sheets represents a major challenge. Development of a non-woven material-based full ceramic separator with laminating capability is planned to compensate, which will prove an important technical innovation. Initial successes with laminating capable separators have been achieved with the ZSW research platform FPL's "electrode winder". For instance, lithium-ion cells with laminating capable separators demonstrate reduced coiling thickness (see fig. below). This allows a greater number of electrode layers to be incorporated per cell and thus the energy density to be increased.



// Wickeldicken in Abhängigkeit des Separators mit dazugehörigen 3-D-CT-Aufnahmen (vertikaler Querschnitt). Laminierfähige Separatoren führen zu homogenen Wickeln und reduzierter Wickeldicke.
// Coiling thicknesses dependent on separator with associated 3D-CT images (vertical cross-section). Laminating capable separators allow for more homogeneous coiling and reduced coiling thickness.

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

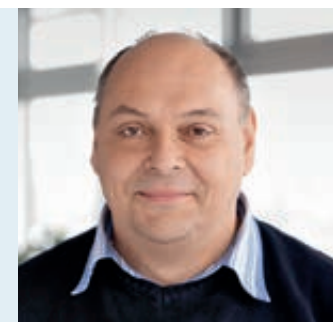
// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet untersucht und entwickelt elektrochemische Energiespeichersysteme. Damit Akkumulatoren auch unter schwierigsten Bedingungen sicher und leistungsfähig sind, stehen deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen und die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung oder in Unfallsituationen im Mittelpunkt der Arbeiten. Die betrachteten Einsatzbereiche der Batterien umfassen die stationäre Energiespeicherung in Heimsystemen und elektrischen Netzen, in portablen Geräten genauso wie in elektrifizierten Antriebssträngen – ob zu Land, zu Wasser oder für die Luftfahrt.

Im elektrischen Batterietest werden Zellen, Module und Systeme auf Funktionalität geprüft, ihre Leistungsfähigkeit vermessen und die zu erwartende Lebensdauer unter definierten Belastungen und Umgebungsbedingungen bestimmt. Mittels Belastungen im Grenzbereich oder zerstörerischer Tests werden die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie deren Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilt. Schwerpunkte bilden dabei die Unterdrückung der Fehlerausbreitung im System (Propagation) und die Brandlöschung bzw. Brandkontrolle.

Herzstück der Batteriesystemtechnik sind die thermische und elektrische Modellierung und Simulation von Zellen und Batteriesystemen, das Batteriemanagement sowie die Batteriezustandsbestimmung. Erforscht werden modellbasierte Algorithmen zur Zustandsbestimmung (Ladezustand und Alterung), zur Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit, zur optimalen Laderegelung insbesondere unter Schnellladebedingungen und zum Energiemanagement. Weitere Untersuchungen betreffen den Einfluss von externen Parametern wie Rippelströmen oder mechanischen Kompressionskräften auf die Performance und Lebensdauer.



„Im eLaB erforschen, testen und untersuchen wir Batterien und Systeme flexibel, normgerecht und innovativ.“

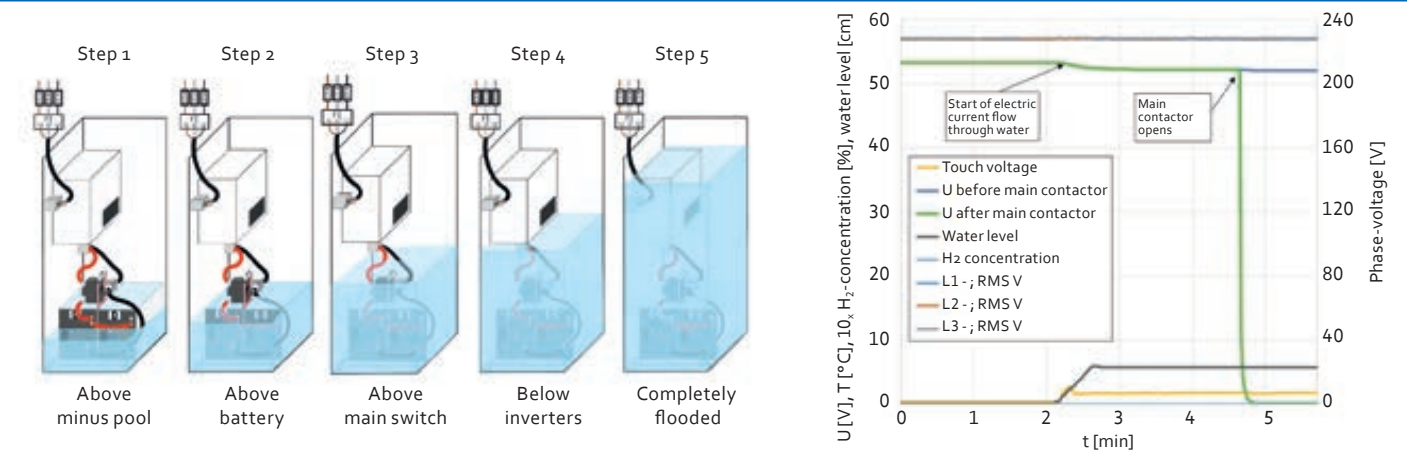
// Dr. Harry Döring, Head of Department
E-mail: harry.doering@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-506

// Our main focus

The research department investigates and develops electrochemical energy storage systems. To ensure that accumulators are safe and efficient even under the most extreme conditions, the department's work focuses on characterising them under various operating conditions and investigating their behaviour with operating failures and in accident situations. The areas of application of the batteries include stationary energy storage systems and electrical grids, portable devices and electrified drive trains – whether for travel over land or water, or in the air.

The electric battery test serves to test the functionality of cells, modules and systems, measure their performance and determine their expected service life under defined loads and environmental conditions. Boundary loads or destructive tests are used to assess the reactions of and potential dangers posed by batteries in the event of extreme damage as well as their resistance to various abusive conditions and operating errors. One focus here is on suppressing the propagation of failures in the system and extinguishing or controlling fires.

The centrepiece of the battery system engineering comprises the thermal and electrical modelling and simulation of cells and battery systems, battery management and battery level identification. Research looks at model-based algorithms in order to determine the battery state (state of charge and ageing), predict the system performance, ensure optimal charge control – especially under fast-charging conditions, and improve energy management. Further research looks at the influence of external parameters such as ripple currents or mechanical compression forces on performance and service life.



// Sicherheitsaspekte von Batterien

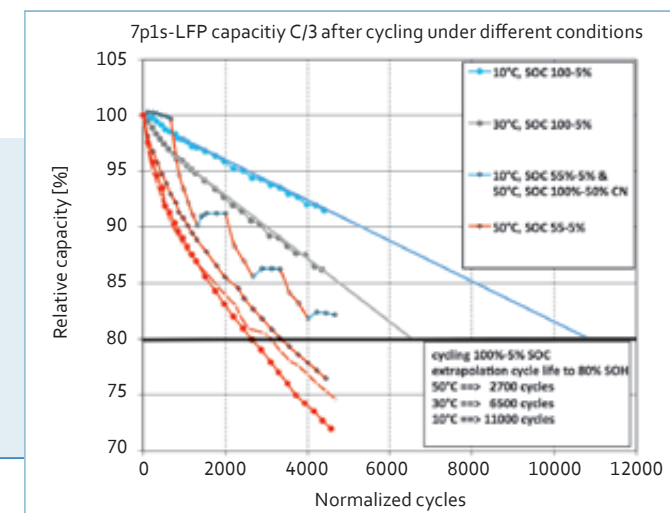
In den beiden vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekten „Sicherheit und Netzdienlichkeit von elektrischen Heimspeichersystemen mit Li-Ionen-Batterien“ und „Sicherheit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen mit Speichersystemen“ untersucht das ZSW das Alterungs- und Missbrauchsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien in stationären Heimspeichern. Hierzu zeigten Untersuchungen zu den Umgebungs- und Belastungsbedingungen, wie Betriebstemperatur und Nutzung in Bezug auf den Ladezustand bzw. die Entladetiefe, gravierenden Einfluss auf die Lebens- und Nutzungsdauer des Speichers mit LFP-Zellen (Li-Eisen-Phosphat) haben. Die Betriebstemperatur erwies sich als stärkster Faktor – steigende Temperaturen führten zum beschleunigten Kapazitätsverlust. Dies wird am deutlichsten beim simulierten „Sommer-Winter-Betrieb“ mit stagnierendem bzw. regenerierendem Kapazitätsverlauf bei niedrigen Temperaturen und erneut hohem Kapazitätsverlust bei erhöhten Temperaturen (s. Abb. unten).

Ein weiterer Aspekt beinhaltet die experimentelle Analyse der Gefährdung durch Wassereintrich in den Betriebsraum bei Überflutung oder durch häusliche Wasserschäden. Die Gefahren bestehen einerseits durch Elektrolyse, Gasbildung (H₂, O₂) und Korrosion metallischer Teile, andererseits durch die elektrische Gefährdung von Personen. Die Abbildung oben zeigt die Reaktion des Speichersystems auf den steigenden Wasserstand. Das Batteriemanagementsystem (BMS) erkennt, dass der Isolationswiderstand innerhalb der Batterie einen definierten Wert unterschritten hat, und löst somit den Batteriehaupschalter aus. Zu einem späteren Zeitpunkt folgt die Trennung vom Netz über den FI-Schalter. Die Gasentwicklung an der Batterie kann nicht verhindert werden: Die höchste gemessene H₂-Bildungsrate lag bei 0,4 l/min, die Gesamtmenge an H₂ betrug für die 5-kWh-Batterie ca. 70 Liter. Die Batterietemperaturen wurden bis ca. 65 °C gemessen.

// Safety aspects of batteries

The ageing characteristics of lithium-ion batteries and their abuse behaviour in stationary domestic storage systems are the subject of research conducted by ZSW in the “Safety and grid-subservience of domestic electric storage systems with Li-ion batteries” and “Safety and reliability of PV systems with storage systems” projects, both funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Investigations in this regard into ambient and load conditions such as operating temperature and utilisation in relation to charge state and depth of discharge have shown the impact on the service life and usage duration of storage systems with LFP cells (lithium iron phosphate) to be severe. The operating temperature proved the most influential factor – rising temperatures led to accelerated capacity loss. This is most evident in a simulated “summer-winter operation” with a stagnant or regenerating capacity curve at low temperatures and a high capacity loss again at elevated temperatures (see fig. below).

A further aspect entailed the experimental analysis of risk due to water ingress into the service space in the event of flooding or damage to domestic water systems. Risk is posed on the one hand by electrolysis, gas formation (H₂, O₂) and the corrosion of metallic parts and, on the other, by the electrical hazard to personnel. The figure above shows the response of the storage system to a rising water level. The battery management system (BMS) detects the isolation resistance within the battery exceeding a defined value, triggering the main battery switch. Disconnection from the mains occurs at a subsequent point via the FI switch. Gassing at the battery cannot be prevented: The highest measured H₂ formation rate was recorded at 0.4 l/min; the total volume of H₂ was measured at 70 litres for the 5 kWh battery; battery temperatures were measured up to approx. 65 °C.



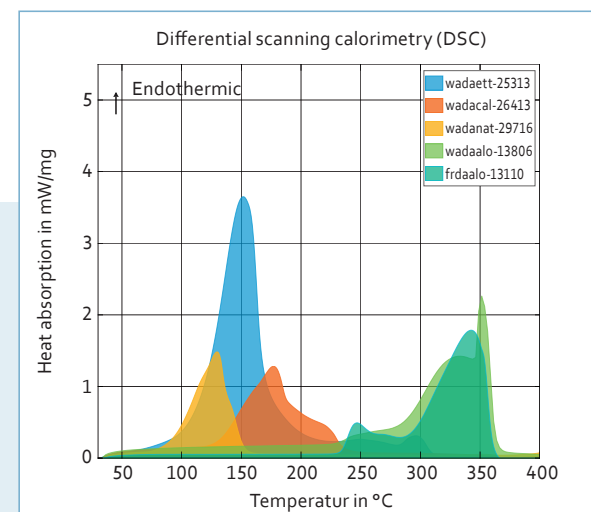
// Verlauf des Kapazitätsverlusts in Abhängigkeit von der normierten Zyklenzahl bei verschiedenen Betriebsbedingungen (in Rot).
// Capacity loss as a function of the normalised number of cycles under different operating conditions (in red).

// Joaquín Klee Barillas
E-mail: joaquin.klee-barillas@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-536



// Propagationsuntersuchungen mit Barrierematerialien

Die Optimierung der Reichweite von Elektrofahrzeugen und die daraus resultierende Erhöhung der Packungsdichte von Batteriezellen führt zu neuen Herausforderungen bei der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien. Durch ein geeignetes Moduldesign müssen verschiedene Anforderungen erfüllt werden. Diese betreffen insbesondere die Wärmeabfuhr im Betrieb, den mechanischen Ausgleich der Zellatmung sowie die Sicherheit in Crash-Situationen oder bei spontanen Fehlerfällen. Äußere Einflüsse oder ein singulärer Fehler in einer Zelle können zum sogenannten thermischen Durchgehen (thermal runaway) einer Zelle in einem Batteriemodul führen. Dabei wird diese durch interne exotherme Reaktionen zerstört und setzt große Energiemengen frei. Diese können im Speicher zu Kettenreaktionen führen (Propagation), sodass nicht nur eine einzelne Zelle betroffen ist, sondern das gesamte Batteriepaket in Mitleidenschaft gezogen wird und dadurch extrem große Energiemengen in der Regel mit Brand freigesetzt werden. Um dies zu vermeiden, entwickelt das ZSW Barrierematerialien, die zwischen den Zellen angeordnet werden. Sie zersetzen sich ab einer bestimmten Temperatur endotherm, absorbieren einen Teil der freigesetzten Energie und isolieren die defekte Zelle gegenüber Nachbarzellen, um ein thermisches Durchgehen von weiteren Zellen zu verhindern. Sind diese Barriere-Elemente als Elastomere ausgelegt, können sie die Volumenänderung beim Laden und Entladen der Zellen ausgleichen (s. Abb. unten). Durch eine individuell einstellbare Elastizität des Materials werden der resultierende Volumenzuwachs ausgeglichen und die entstehende Kraft im Modul kompensiert. Weiterhin sorgen die Kompositmaterialien für eine gleichmäßige Kraftverteilung und gleichen Maßtoleranzen und Unebenheiten aus.



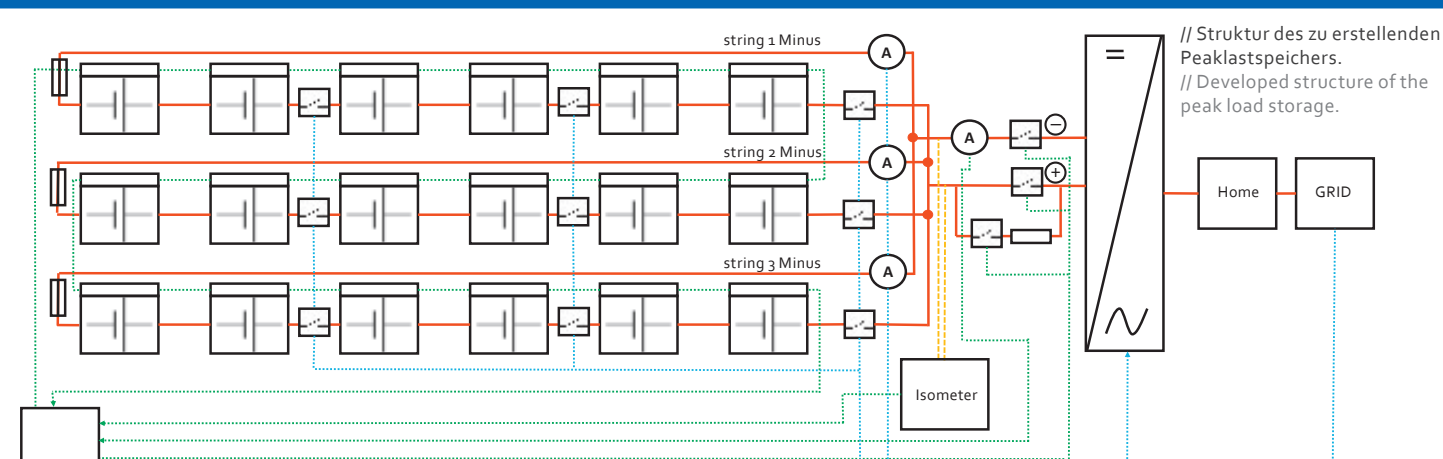
// Dynamische Differenzialkalorimetrie (DSC) von verschiedenen endothermen Materialien (links) und Versuchsaufbau zum Nachweis der Propagationsverzögerung durch Barrierematerialien (oben).
 // Dynamic differential scanning calorimetry (DSC) of various endothermic materials (left) and experimental set-up for verifying propagation retardation through barrier materials (top).

// Michael Wörz
 E-mail: michael.woerz@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-505

// Propagation testing with barrier materials

Optimising the range of electric vehicles and the increased packing density of battery cells creates new challenges with respect to the development of lithium-ion batteries. Adequate module design must fulfil various requirements. These concern in particular heat removal during operation, the mechanical balancing of cell breathing and safety considerations in crash situations or in the case of spontaneous faults.

External influences or a singular fault within a cell can lead to the "thermal runaway" of a cell in a battery module. This results in its destruction from internal exothermic reactions and releases large amounts of energy. This can lead to a chain reaction (propagation) in the storage system affecting not just the one cell but the entire battery pack, with very large amounts of energy released, usually involving fire. To avoid this, ZSW develops barrier materials that are arranged between the cells, which endothermically degrade above a certain temperature, absorb a proportion of the energy released and isolate the defective cell from neighbouring cells, to prevent thermal runaway affecting additional cells. If such barrier elements are designed as elastomers, they are able to compensate for the change in volume when charging and discharging cells (see fig. below). Through individual adjustability of the material's elasticity, the resulting increase in volume is balanced out and the force produced in the module compensated for. Furthermore, the composite materials ensure uniform force distribution and balance out dimensional tolerances and irregularities.

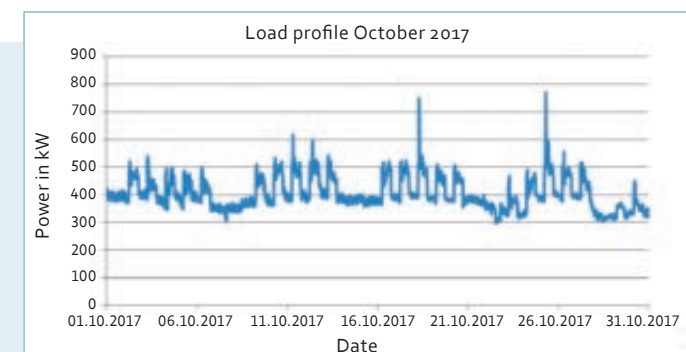


// Analyse und Aufbau eines Peaklastspeichers

Für die Stabilität der Stromversorgung werden Batterien in Erwägung gezogen, die nicht nur als Notstrombatterie bei Netzausfall dienen, sondern auch zur Deckung der Peaklast, zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage, zur Frequenzstabilisierung u. ä.

Die Analyse für ein Laborgebäude des ZSW ergab, dass es periodisch zu Peakbelastungen im Hausnetz kommt, die zur erhöhten Leistungsbelastung des Netzes und damit zu erhöhten Kosten führten. Der in der Abbildung unten gezeigte Lastgang zeigt, dass in diesem Zeitbereich eine Bereitstellung von 500 bis 550 kW ausreichend wären, wenn nicht die wenigen Lastspitzen durch Großverbraucher auftreten würden. Da sich die Lastspitzen durch Lastmanagement allein nicht vermeiden lassen, wurde ein Konzept für einen Batterie-Peaklastspeicher erstellt. Dieser soll batterie-seitig durch drei Strings mit jeweils sechs Modulen realisiert werden (s. Abb. oben). Jedes Modul besteht aus einer 12s4p-Verschaltung von 40Ah-LiC-NMC-Zellen mit einem Energieinhalt von ca. 7,5 kWh. Der Gesamtspeicher wird einen Energieinhalt von 135 kWh haben und eine Leistung von ca. 80 bis 90 kW. Durch die Kappung der Leistungsspitzen mit 80 kW lässt sich eine jährliche Stromkostenersparnis von ca. 7.500 € erzielen.

Derzeit wurde ein Pilotmodul aufgebaut und befindet sich in der Parametrierung und der thermischen Vermessung. Mithilfe dieser Daten wird dann das Batteriemanagementsystem parametrier, um eine sichere Betriebsweise des Batteriespeichers zu garantieren. Untersuchungen zum Abuse-Verhalten der Zellen werden die Batterieentwicklung begleiten und in das Design und den Aufbau einer sicheren Batterie einfließen. Neben der Funktion als Peaklastspeicher sollen an diesem Speicher fortlaufend Messungen ausgeführt werden, sodass verschiedene Aspekte des Betriebes, der Alterung und des generellen Verhaltens des Speichers über lange Zeiträume verfolgt werden können.



// Analysis and structure of a peak load storage

Batteries are gaining in importance as a means of ensuring the reliability of power supply, not only as emergency batteries in the event of a power failure, but also to cover peak load requirements, to balance supply and demand and for frequency stabilisation and the like.

The analysis for a laboratory building of the ZSW has shown that peak loads occur periodically throughout the building grid, which leads to an increased power load on the grid and raised costs. The load curve below shows that during this time period, a provision of 500 to 550 kW would suffice if the few load peaks caused by large-scale consumers did not occur. Since load peaks cannot be avoided through load management alone, a concept for a battery peak load storage was developed. It will be realised on the battery side by three strings with six modules each (see fig. above). Each module consists of a 12s4p type battery pack of 40 Ah LiC-NMC cells with an energy content of approximately 7.5 kWh. The overall storage will have an energy content of 135 kWh and a rated power of approx. 80 to 90 kW. An annual electricity cost reduction of approx. € 7,500 could be achieved by limiting the power peaks to 80 kW.

As of now, a pilot module has been set up and is in the process of parameterisation and thermal characterisation. With this data, the battery management system is then parameterised to ensure safe operation of the battery storage system. Investigations into the abuse behaviour of the cells will accompany battery development and be incorporated into the design and construction of a safe battery. In addition to its function as a peak load storage, the battery is to be subjected to continuous measurements so that various aspects of operation, ageing and the general behaviour of the storage system can be monitored over long periods of time.

// Verlauf des Leistungsbedarfs des ZSW-Labors für Batterietechnologie (eLaB).
 // ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB) power requirement.

// Dr. Marius Bauer
 E-mail: marius.bauer@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-588

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECG erforscht Elektroden in Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC), Elektrolyseuren und elektrochemischen Hochleistungsspeichern mit wässrigem Elektrolyt. Ziele dieser Arbeiten sind, die Leistungsdichte und Lebensdauer zu steigern und Kosten zu reduzieren.

Um die Leistungsdichte zu steigern und den Edelmetallbedarf von PEMFC zu verringern, optimiert das Fachgebiet die Zusammensetzung und Mikrostruktur der Katalysatorschichten. Die Expertise umfasst mikrostrukturelle Analysen und Analysen der Polymerverteilung in den Elektroden der Membran-Elektroden-Anordnung (MEAs). Für die alkalische Wasserelektrolyse, für Hochleistungsspeicher mit wässrig-alkalischen Elektrolyten und zur Herstellung bifunktionaler Sauerstoffspeicherelektroden konnten Untersuchungen mit verschiedenen Arten nanostrukturierter Nickelmaterialien durchgeführt werden, die bereits hohe Aktivitäten und Zyklenfestigkeiten aufweisen. Besonders bedeutsam ist die Entwicklung einer in stark alkalischen Elektrolyten zyklischen Manganoxid-Hochleistungselektrode.

Das Team verfügt über langjährige Erfahrung und die nötige Infrastruktur, um neue technologische Ansätze aufzugreifen und schnell im Labor zu verifizieren und demonstrieren. Durch die enge Kooperation mit den anderen ZSW-Fachgebieten sind auch umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Modell-elektroden und Modellzellen mittels Modellierungs- und Simulationstechniken sowie Tests in großformatigen Zellen und Stacks effizient durchführbar.

// Our main focus

The ECG department is researching electrodes in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC), electrolyzers and electrochemical high-power storage devices with aqueous electrolytes. The aims are to increase power density and service life, as well as to reduce costs.

In order to increase power density and reduce the precious metal requirement of PEMFC, the department optimises both the composition and microstructure of the catalyst layers. Its expertise includes microstructural analyses and analyses of the polymer distribution in the electrodes of the membrane electrode array (MEAs). Experiments are being carried out with various types of nanostructured nickel materials for alkaline water electrolysis, for high-power storage systems with aqueous-alkaline electrolytes and for the production of bifunctional oxygen electrodes. High activities and cycle stabilities have already been demonstrated. Of particular importance is the development of a manganese oxide high-power electrode with a strong cycle stability in very alkaline electrolytes.

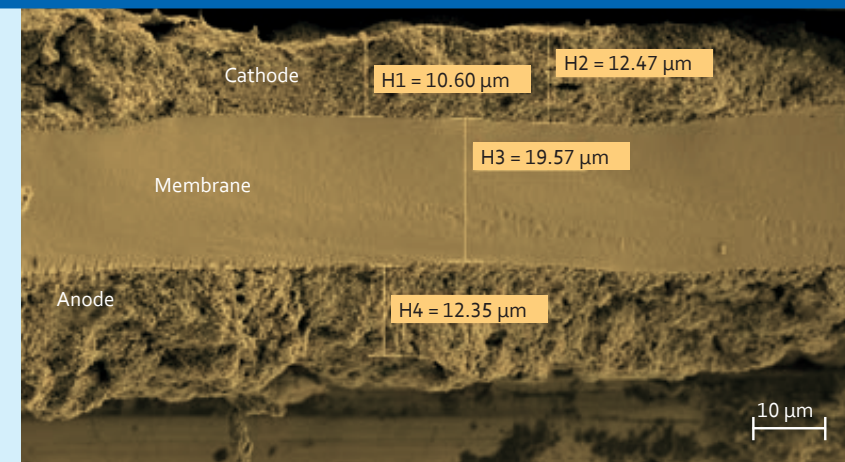
The team has many years of experience and the necessary infrastructure to take new technological approaches and quickly verify and demonstrate them in the laboratory. Due to the close cooperation with other ZSW departments, extensive experimental investigations on model electrodes and model cells using modelling and simulation techniques as well as tests in large-format cells and stacks can be carried out efficiently.



„Wir forschen und entwickeln, um neue Materialien und Komponenten für Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Hochleistungsspeicher und Metall-Luft-Zellen bereitstellen zu können.“

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

“We research and develop new materials and components for fuel cells, electrolyzers, high-capacity storage systems and metal-air cells.”

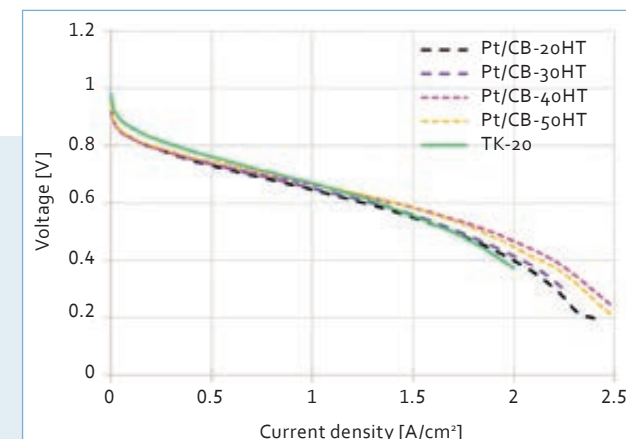


// REM-Aufnahme einer selbstgemachten MEA (Querschnitt).
Kathode: selbstgemachter Katalysator (40 % Pt/CB).
Anode: kommerzieller Katalysator (20 % Pt/CB).
// SEM image of a homemade MEA cross section.
Cathode: home made catalyst (40 % Pt/CB).
Anode: commercial catalyst (20 % Pt/CB).

// Einfluss der Platinschichtdicke auf die Leistungscharakteristik der MEA

Neben einer hohen intrinsischen katalytischen Aktivität werden mittlerweile die Stofftransporteigenschaften der Katalysatorschichten immer entscheidender für die Leistungscharakteristik von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten Projekts „AutoStack-Industrie“ wurde der Einfluss der Katalysatorschichtdicke durch Variation des Edelmetallgehalts geträgerter Katalysatoren auf die Leistungscharakteristik einer MEA untersucht. Hierzu wurden Platin-(Pt)-Nanopartikel mit unterschiedlichem Gehalt nach einer modifizierten Polyolmethode auf einem Rußträger (Vulcan XC72) abgeschieden und mit einer Nafion-211-Membran (25 μm) zu einer MEA mit einer Kathodenbeladung von 0,25 mg/cm² verarbeitet (s. Abb. oben). Als Vergleich diente ein kommerzieller Katalysator mit einem Pt-Gehalt von 20 % auf einem hochoberflächigen Ruß. Die Anode bestand aus einem kommerziellen Katalysator mit einer Beladung von 0,1 mg/cm².

Man erkennt (s. Abb. unten) die hohe anfängliche katalytische Aktivität sowie die frühzeitig einsetzende Stofftransporthemmung der MEA mit dem kommerziellen Katalysator (20 % Pt). Dieser weist auch die höchste elektrochemisch aktive Oberfläche auf (102 m²/g). Die im Haus hergestellten Katalysatoren weisen eine mit zunehmendem Edelmetallgehalt abnehmende elektrochemisch aktive Oberfläche und höhere Aktivierungsüberspannung auf, zeigen jedoch zunächst mit zunehmendem Edelmetallgehalt des Katalysators (abnehmender Katalysatorschichtdicke) eine abnehmende Stofftransporthemmung. Überraschenderweise ergibt sich bei Verwendung des Katalysators mit dem höchsten Edelmetallgehalt (geringste Schichtdicke) wieder eine Zunahme der Stofftransporteffekte. Dieses Verhalten ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.



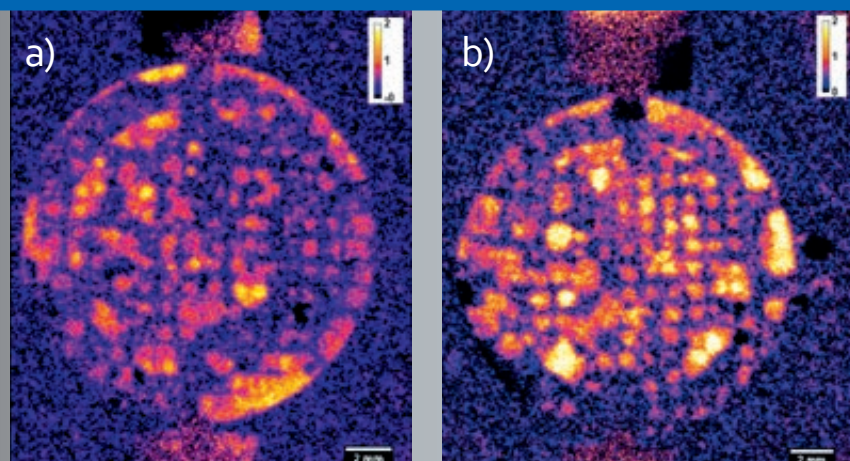
// Influence of the platinum thickness on the performance characteristics of the MEA

In addition to high intrinsic catalytic activity, the material transport properties of the catalyst layers are becoming increasingly important for the performance characteristics of membrane electrode assemblies (MEAs) of polymer electrolyte membrane fuel cells. Within the framework of the “AutoStack-Industrie” project funded by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, the impact of catalyst layer thickness on the performance characteristics of an MEA was investigated by varying the precious metal content of supported catalysts. Platinum (Pt) nanoparticles with differing contents were deposited on carbon black (Vulcan XC72) following a modified polyol method, and combined with a Nafion-211 membrane (25 μm) to form MEA with a cathode loading of 0.25 mg/cm² (see figure above). A commercial catalyst with a Pt content of 20% on a high surface area carbon black substrate served as a basis of comparison. The anode consisted of a commercial catalyst with a loading of 0.1 mg/cm².

The high initial catalytic activity and the early onset of mass transport inhibition of the MEA with a commercial catalyst (20% Pt) is visible (see fig. below). It also has the highest electrochemically active surface area (102 m²/g). The in-house catalysts exhibit a reduced electrochemically active surface area with increasing precious metal content and a higher activation overpotential, but they initially exhibit lowered mass transport inhibition with rising precious metal content of the catalyst (decreasing catalyst layer thickness). Surprisingly, when using the catalyst with the highest precious metal content (lowest layer thickness), the mass transport effects increase again. This behaviour is the subject of further investigations.

// Strom-Spannungskurven von MEAs mit verschiedenen Katalysator-Schichtdicken.
H₂/Luft; Pt-Beladung A/C 0,1/0,25 mg/cm²; T = 80 °C; DP A/C: 80 °C/84 °C
Stoich: A/C 1,8/3; p: 150 kPa; Ionomer/Carboneon (cathode) 0,83.
// Current-voltage curves of MEAs with different catalyst layer thicknesses.
H₂/air; Pt loading A/C 0.1 / 0.25 mg/cm²; T = 80 °C; DP A/C: 80 °C / 84 °C Stoich:
A/C 1.8 / 3; p: 150 kPa; ionomer/carboneon (cathode) 0.83.

// Dr. Paritosh Mohanta
E-mail: paritosh.mohanta@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-211



// In-situ-Neutronenradiogramme unterschiedlich beschichteter Elektroden (a, b) mit identischer Stromdichte und Elektrolytfluss. Helle Bereiche zeigen einen hohen Gasanteil. Die Elektrode (b) weist eine homogenere Gasverteilung auf.
// In-situ neutron radiograms of differently coated electrodes (a, b) with identical current density and electrolyte flow. Bright areas indicate high gas content. The electrode (b) exhibits more homogeneous gas distribution.

// In-situ-Charakterisierung einer Elektrolysezelle mit Neutronenradiografie

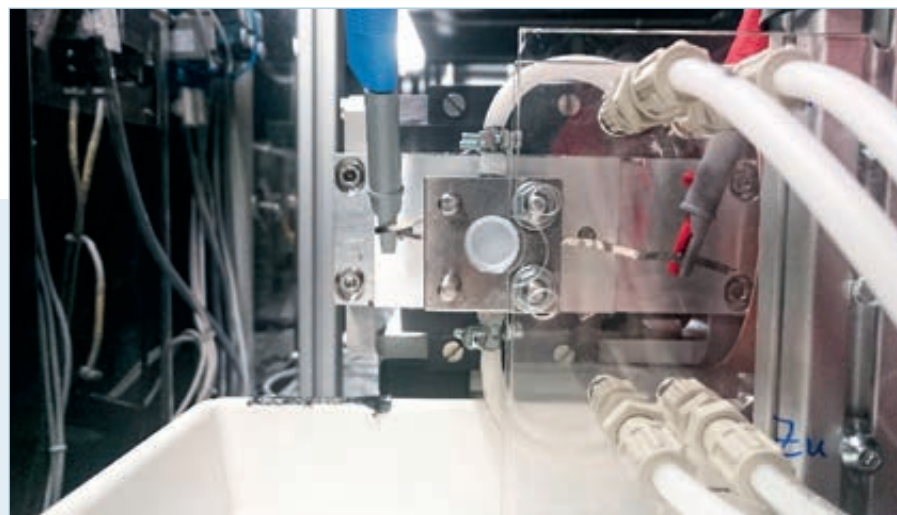
Die Wasserelektrolyse im alkalischen Elektrolyten bietet Kostenvorteile, da für Elektroden und Stromableiter kostengünstige Materialien eingesetzt werden können. Üblicherweise werden die Elektroden mit hochoberflächigem Nickel (Raney-Nickel) aktiviert, das durch Zersetzung von Nickellegierungen hergestellt wird.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt AEL₃D werden Elektroden mit alternativen nanostrukturierten Katalysatoren untersucht. Um die Elektrodenmikrostruktur und Elektrodenzusammensetzung zu optimieren, wurden der Beschichtungsprozess variiert und die Katalysatoradditive wie Eisen untersucht. Die experimentellen Arbeiten wurden durch Zwei-Phasen-Strömungssimulationen und In-situ-Neutronenradiografie begleitet. Hierzu wurden eine spezielle Zelle und ein dazu gehörender Prüfstand entwickelt (s. Abb. unten). Die Bildgebung mit Neutronenstrahlen ergab erste Hinweise auf Blasenbildung und Blasenbewegung während der Sauerstoffentwicklung in dreidimensional strukturierten Elektroden (s. Abb. oben). Die Bilder liefern wichtige Hinweise zur Validierung von Simulationsrechnungen und zur Verbesserung der eingesetzten Messzellen.

// In-situ characterisation of an electrolysis cell using neutron radiography

Water electrolysis in alkaline electrolytes offers cost advantages, as cost-effective materials can be used for the electrodes and current collectors. Usually the electrodes are activated with high surface nickel (Raney nickel), which is produced in the decomposition of nickel alloys.

Electrodes with alternative nanostructured catalysts are being investigated in the AEL₃D project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. In order to optimise electrode microstructure and composition, the coating process was varied and catalyst additives such as iron were investigated. The experimental work was supported by two-phase flow simulations and in-situ neutron radiography. A special cell and a corresponding test rig were developed for this purpose (see figure below). Imaging with neutron beams revealed first indications of bubble formation and bubble movement during oxygen production in three-dimensionally structured electrodes (see figure above). The images provide important information required for the validation of simulation calculations and the improvement of the measuring cells used.



// In-Situ-Messzelle für Neutronenradiografie.
// In-situ measuring cell for neutron radiography.

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



// Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer 5-μm-MnO₂-Schicht auf nano-strukturierten Nিকেlelektroden.
// Scanning electron microscope image of a 5-μm-MnO₂ layer on nanostructured nickel electrodes.

// Reversible Mangandioxid-Elektrode in wässrig-alkalischen Elektrolyten

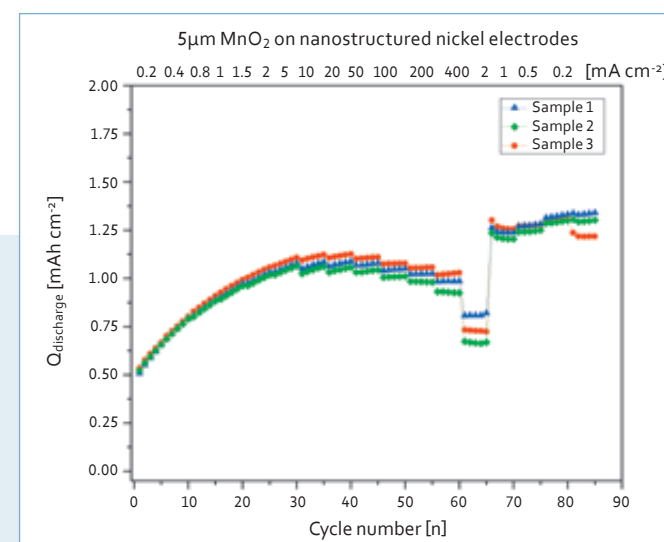
Mangandioxid (MnO₂) ist als kostengünstiges, weit verfügbares, zuverlässiges und hochkapazitives Kathodenmaterial mit geringerer Toxizität allseits bekannt aus primären Alkali-Mangan-Batterien. Seit vielen Jahrzehnten wird versucht, die Zyklisierbarkeit des Materials in alkalischen Elektrolyten zu erhöhen, um wiederaufladbare Alkali-Mangan-Akkumulatoren herzustellen. Ansätze in neutralen Elektrolyten zeigen ausgesprochen gute Zyklisierbarkeiten des Mangandioxids, jedoch erreichen die spezifischen Kapazitäten nicht die Werte, die in primären alkalischen Zellen erreicht werden.

Auf Basis der am ZSW entwickelten nanostrukturierten Nickel-elektroden ist es nun erstmals gelungen, einen stabilen Abscheidungsprozess zu entwickeln, der es erlaubt, MnO₂-Schichten mit reproduzierbaren Schichtdicken herzustellen. Die MnO₂-Schichten (s. Abb. oben) können in alkalischen Elektrolyten entladen und wieder geladen werden. Damit öffnen diese Elektroden eine weitere Möglichkeit, das Verständnis für die Randbedingungen der MnO₂-Zyklisierung in alkalischen Elektrolyten zu vertiefen. Die Elektroden erweisen sich als erstaunlich hochstromfähig. Die Stromdichte-abhängige Abnahme der Kapazität wird erst ab Belastungen von etwa 200 C beobachtet – dies entspricht einer vollständigen Entladung innerhalb von Sekunden (s. Abb. unten). In ersten Dauertests konnten mit diesen Elektroden bereits mehr als 2.000 Vollzyklen erreicht werden. Sie zeigen ein ausgeprägtes Formierungsverhalten, das weiterer Untersuchungen bedarf, um die dabei ablaufenden Prozesse besser zu verstehen und zu optimieren.

// Reversible manganese dioxide electrode in aqueous alkaline electrolytes

Manganese dioxide (MnO₂) as used in primary alkaline manganese batteries is widely known as a low-cost, low-toxicity, widely available, reliable and high capacity cathode material. For several decades, attempts have been made to increase the cyclability of the material in alkaline electrolytes in order to manufacture rechargeable alkaline manganese batteries. Neutral electrolyte approaches exhibit very good cyclability of manganese dioxide, but their specific capacities do not reach the values achieved by primary alkaline cells.

Based on the nanostructured nickel electrodes developed at ZSW, it has now been possible for the first time to develop a stable deposition process that makes it possible to produce MnO₂ layers with a reproducible layer thickness. The MnO₂ layers produced (see fig. above) can be discharged and recharged in alkaline electrolytes. These electrodes thus offer a further opportunity to deepen our understanding of the boundary conditions of MnO₂ cyclisation in alkaline electrolytes. The electrodes prove to be surprisingly high-current capable. The current density-dependent capacity decrease is only observed starting at loads of about 200 C. This corresponds to a complete discharge within seconds (see fig. below). In initial battery endurance tests, more than 2,000 full cycles have already been achieved with these electrodes. They showed a distinctive formation behaviour that calls for further investigation in order to better understand and optimise the processes involved.

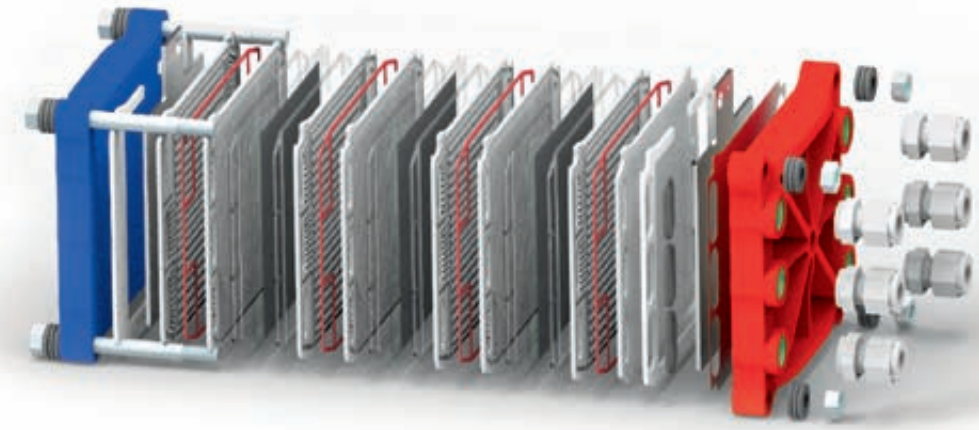


// Stromdichte-abhängige Kapazität von 5-μm-MnO₂-Schichten auf nano-strukturierten Nিকেlelektroden in 6,0 M KOH.
// Current density-dependent capacity of 5-μm MnO₂ layers on nanostructured nickel electrodes in 6.0 M KOH.

// Dr. Olaf Böse
E-mail: olaf.boese@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 der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen-(PEMFC)-Technologie mit Fokus auf Konstruktion, Charakterisierung und Simulation von Brennstoffzellen-Stacks und Komponenten sowie auf den Bau von Prototypen und die Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien. Der Leistungsbereich erstreckt sich von wenigen Watt bis zu 100 kW_{el}. Brennstoffzellen können auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit optimiert werden. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und Fehleranalysen. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von manuellen und automatisierten Herstelltechniken und die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks einschließlich automobiltauglicher Brennstoffzellen.

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Vorgänge in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels modernster Simulationssoftware ein, die an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten verifiziert werden kann. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden (GDL) und Gasverteilerstrukturen mittels einer μ -CT-Anlage validiert. Mit dieser Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden. Ergänzend stehen mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiografie und -tomografie zur Visualisierung von Komponenten, Zellen und Stacks zur Verfügung, deren zeitliche und räumliche Auflösungen zu den weltweit besten gehören.

// Our main focus

The research department is specialised in the development of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) technology with the focus on the construction, characterisation and simulation of fuel cells stacks and components and the construction of prototypes, as well as the development of production and test technologies. The power output ranges from a few watts up to 100 kW_{el}. Fuel cells can be optimised in terms of their performance, service life, efficiency and compactness. Among other things, this includes investigating and forecasting ageing processes and failure analyses. We also focus on developing manual and automated manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks, including fuel cells suitable for vehicles.

Modelling and simulating processes in fuel cells enables us to rapidly optimise component structures and operating conditions. This also includes the development and establishment of completely new approaches using advanced simulation software that is verified by using conclusive hardware and experiments under realistic conditions. For example, the water management within the gas diffusion electrodes (GDL) and gas distribution structures is validated using μ -CT scanning. Using this system, GDL structures, including their water content, can also be investigated in a compressed state. In addition, neutron and synchrotron radiography and tomography techniques developed with the Helmholtz Centre Berlin (HZB) are available for visualising components, cells and stacks, whereby the temporal and spatial resolutions of these are among the best in the world.

// Modellierung der Wasserverteilung in Gasdiffusionslagen und Katalysatoren

Das ZSW verfügt über langjährige Erfahrung bei der Modellierung der Wasserverteilung innerhalb der Gasdiffusionsschichten (GDL) und Katalysatorschichten (CL) von Brennstoffzellen (PEMFCs). Hierzu wurde ein Monte-Carlo-Modell (MC) entwickelt, mit dem die stationäre Verteilung flüssiger Wasseragglomerate in realen Strukturen unter Berücksichtigung realistischer Randbedingungen und Oberflächenbenetzungseigenschaften simuliert werden kann.

In einem jetzt neu entwickelten kinetischen Monte-Carlo-Modell (KMC) mit mehreren Zeitspannen konnte die Zeitachse zum ersten Mal in das Modell integriert werden – und damit auch zeitabhängige Parameter wie die Stromdichte. Die in diesem (Voxel-)KMC-Modell enthaltenen Prozesse sind Wasserbewegungen, die auf der Minimierung der Oberflächenenergie sowie auf der Erzeugung von Wasser als Ergebnis der Stromdichte basieren. Das Wasser wurde an der GDL-CL-Schnittstelle in die Struktur eingeleitet und von der gegenüberliegenden Seite in der Nähe eines Strömungskanals entfernt. Da die Wassererzeugung und -bewegung auf unterschiedlichen Zeitskalen erfolgt, wäre ein inakzeptabler Rechenaufwand erforderlich, um beide Prozesse während der Simulationszeit statistisch zu erfassen. Daher wurde das Modell so konzipiert, dass Prozesse mit verschiedenen Zeitskalen kombiniert werden können.

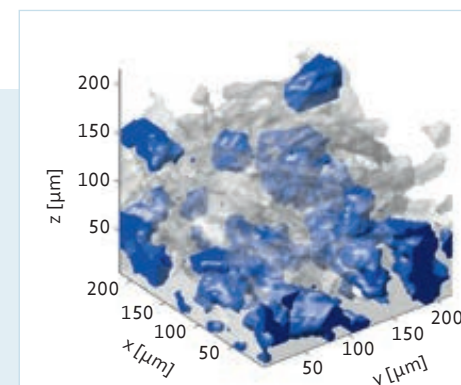
In der Abbildung unten ist beispielhaft ein Zeitpunkt aus einer KMC-Simulation für eine Stromdichte von 1,5 A/cm² dargestellt. Es zeigt die Verteilung von flüssigem Wasser (blau) in einer GDL-Struktur (grau). Wasser tritt von $z = 0$ in die Struktur ein und verlässt es an der gegenüberliegenden Seite. Für zukünftige Studien sollen die Kondensations- und Verdampfungsprozesse in der GDL-Struktur in das Modell integriert werden.

// Modelling the water distribution in gas diffusion layers and catalysts

ZSW has many years of experience in modelling the water distribution within the gas diffusion layers (GDL) and catalyst layers (CL) of fuel cells (PEMFCs). So far, a Monte Carlo (MC) model was developed to simulate the stationary distribution of liquid water agglomerates in real structures, taking into consideration realistic boundary conditions and surface wetting properties.

In the newly developed kinetic Monte Carlo (KMC) model with several time spans, the time axis was integrated into the model for the first time – and thus also time-dependent parameters such as the current density. The processes contained in this (voxel) KMC model are water movements based on minimising surface energy and generating water as a result of the current density. The water was introduced into the structure at the GDL-CL interface and removed from the opposite side near a flow channel. Since the water production and movement takes place on different time scales, an unacceptable computing effort would be necessary to statistically record both processes during the simulation time. The model was therefore designed so that processes can be combined with different time scales.

The figure below shows an example of a point in time from a KMC simulation for a current density of 1.5 A/cm². It shows the distribution of liquid water (blue) in a GDL structure (grey). Water enters the structure from $z = 0$ and leaves it on the opposite side. The condensation and evaporation processes in the GDL structure are to be integrated into the model for future studies.



// Wasserverteilung im GDL-Substrat mittels kinetischer Monte-Carlo-Simulation (KMC) bei einer Stromdichte von 1,5 A/cm².
// Water distribution in the GDL substrate using a kinetic Monte Carlo (KMC) simulation at a current density of 1.5 A/cm².

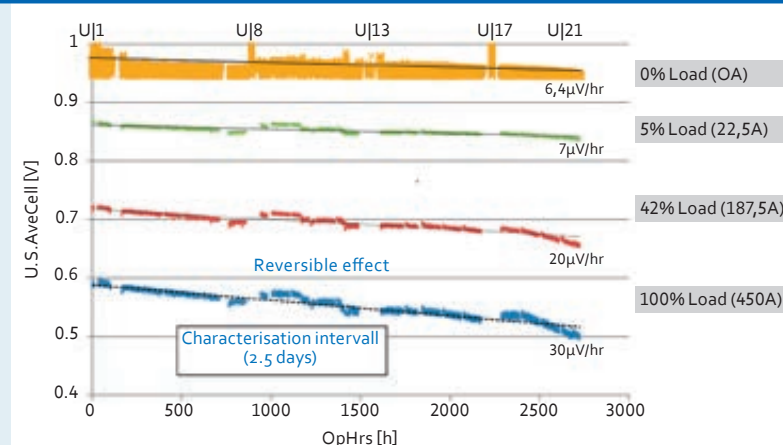


„Im Mittelpunkt unserer Arbeit steht die Optimierung von Brennstoffzellen mit allen ihren Komponenten in Bezug auf Design, Fertigung, Leistung und Lebensdauer.“

// 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



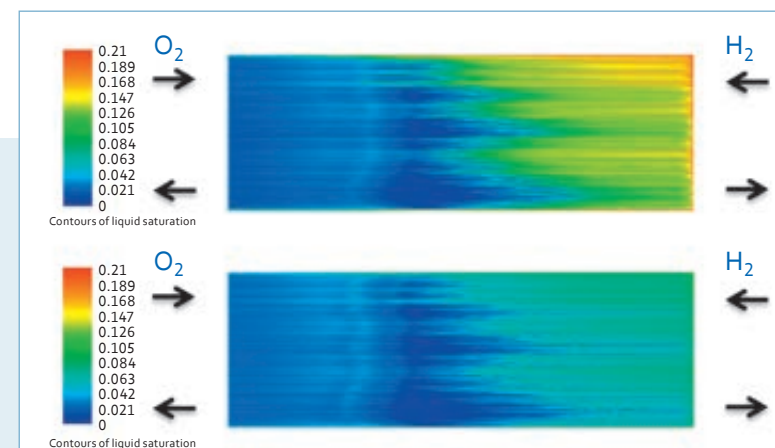
// Messergebnisse: Spannungsdegradation über 2.800 Betriebsstunden bei Betrieb mit fahrzeugtypischem Tageslastprofil.
 // Measurement results: voltage degradation over 2,800 operating hours during operation with a daily load profile typical for a vehicle.

// Alterungseffekte an automobilen Kurzstacks

Im vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt „SoHMuSDaSS“ wurden Alterungseffekte an Brennstoffzellen-Designs untersucht. Hierbei führte das ZSW Alterungsexperimente an mehreren Fünfzell-Brennstoffzellen-Stacks im automobilnahen Design mit einer aktiven Fläche von 300 cm² durch. Als Tageslast wurde ein fahrzeugtypisches 20-minütiges Lastprofil mit kurzen und längeren Standzeiten definiert. Die Testlaufzeit betrug insgesamt mehr als 7.000 h. Nach ca. 2.500 Betriebsstunden kam es zu standzeitunkritischen, jedoch signifikanten Alterungseffekten (s. Abb. oben).

Im Rahmen der Tests wurden anspruchsvolle Diagnosemethoden zur Bestimmung orts aufgelöster Stromdichteverteilungen, Katalysatoroberflächen und Impedanzen entwickelt und eingesetzt. Parallel wurde das Verhalten der Brennstoffzellen einschließlich der, aus experimentell ermittelten Parameteränderungen resultierenden Alterungseffekte mit CFD (Computational Fluid Dynamics) simuliert. Herangezogen wurden die elektrochemische Platin-Oberfläche (ECSA) sowie der innere Kontaktwinkel. Simulation und Experiment zeigten vergleichbare Tendenzen und erlauben z. B. eine relativ genaue Bestimmung des Strom-Spannungsverhaltens einer Zelle in Abhängigkeit von Alterungseffekten.

Die entwickelten und für künftige Fragestellungen zur Verfügung stehenden orts aufgelösten Messungen eignen sich zur Analyse des Einflusses der Betriebsparameter auf lokale Zelleigenschaften sowie zur genaueren Zuordnung der Alterungseffekte. Die Messungen sind sehr hilfreich, um den zeitlichen Verlauf der Alterung (Beispiele ECSA und H₂-Crossover-Verteilungen) zu beurteilen. Mit CFD konnte der alterungsbedingte Einfluss des inneren Kontaktwinkels des GDL-Substrates und der ECSA auf die Zell-Leistung und den lokalen Wasserhaushalt aufgezeigt werden (s. Abb. unten).



// Ageing effects on automotive short stacks

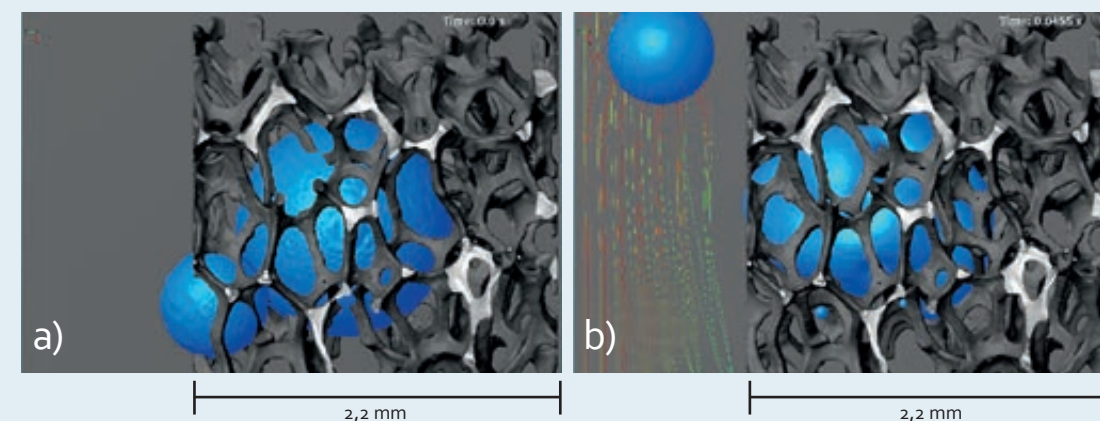
The ageing effects of fuel cell designs were investigated in the SoHMuSDaSS project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. ZSW carried out ageing experiments on several five-cell fuel cell stacks with an active area of 300 cm² and an automotive-based design. The daily load was defined as a 20-minute load profile typical for a vehicle, with short and longer idle times. The test lasted more than 7,000 hours. There were significant ageing effects, independent of the idle times, after about 2,000 operating hours (see fig. above).

Sophisticated diagnostic methods for determining spatially resolved current density distributions, catalyst surfaces and impedances were developed and applied as part of the tests. The behaviour of the fuel cells, including the ageing effects resulting from experimentally determined parameter changes, was simulated in parallel with CFD (Computational Fluid Dynamics). The electrochemical Platinum surface (ECSA) and the inner contact angle were used for this. The simulation and experiment showed comparable tendencies and enable, for example, the current-voltage behaviour of a cell to be determined relatively precisely as a function of the ageing effects.

The spatially resolved measurements developed, which will also be available for future investigations, are suitable for analysing the influence of the operating parameters on local cell properties as well as for more precisely classifying the ageing effects. The measurements are very helpful for assessing the temporal course of the ageing (including the ECSA and H₂ crossover distributions). CFD was used to demonstrate the age-related influence of the inner contact angle of the GDL substrate and the ECSA on the cell performance and the local water balance (see fig. below).

// CFD-Ergebnisse: Flüssigwassersättigung in der Mitte der kathodenseitigen Katalysatorschicht bei Variation des inneren Kontaktwinkels des GDL-Substrats bei einer Stromdichte von 1,5 A cm⁻², oben 110°, unten 98°.
 // CFD results: liquid water saturation in the middle of the cathode-side catalyst layer with variation of the inner contact angle of the GDL substrate at a current density of 1.5 A cm⁻²: above, 110°; below, 98°.

// Matthias Messerschmidt
 E-mail: matthias.messerschmidt@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-205



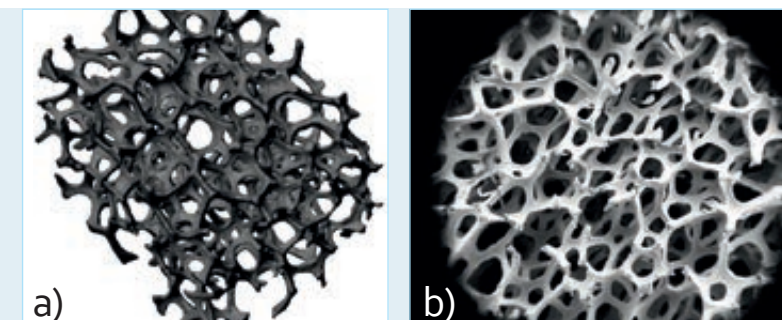
// Grenzfläche zwischen Gas- und Flüssigphase (blau) beim Start (a) und am Ende (b) der VOF-Simulation.
 // Interface between the gas and liquid phase (blue) at the start (a) and end (b) of the VOF simulation.

// Mehrphasen-CFD-Simulation des Gastransportes in einem alkalinen Elektrolyseur

Im vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt „AEL₃D“ geht es um die Entwicklung effizienter Elektroden für die (Wasser-)Elektrolyse. Ein Hauptaugenmerk liegt bei der Optimierung des Produktgaseabtransportes von den Reaktionsplätzen der LGDE (liquid and gas diffusion electrode).

In experimentellen Untersuchungen konnte bei Verwendung von Nickelschäumen als LGDE die Entstehung von großen Blasenclustern speziell bei großen Stromdichten beobachtet werden. Um dies zu simulieren, wurde unter anderem die Volume-of-Fluid (VOF-)Methode angewendet. Die mit AVL FIRE™ durchgeführten Simulationen basieren auf einer aus μ-CT-Aufnahmen gewonnenen Realstruktur eines Nickelschaums (s. Abb. unten), die mit passenden Berechnungselementen vernetzt und dann virtuell mit Flüssigkeit und Gas geflutet wurde. Mit dem VOF-Modell konnten die Phasengrenzen zwischen Flüssig- und Gasphase sowie deren Bewegung detailliert abgebildet werden. Hierzu wurden drei verschiedene Kombinationen von kugelförmigen Gasblasen in die aufbereitete Nickelschaumrealstruktur gesetzt (s. Abb. oben).

Die Simulation ergab, dass die Auftriebskraft bei Blasendurchmessern größer als die Porendurchlässe nicht ausreicht, um die Gasphase durch die Schaumstruktur zu transportieren. Auch kleinere Gasblasen, die sich abspalten, können im Schaum hängen bleiben, wodurch die Bildung von großen Blasenclustern begünstigt wird. Im Beispielfall (s. Abb. oben) wurden nur Blasen nahe des Übergangs von Nickelschaum zum freien Strömungsvolumen ausgetragen. Die Simulation ist damit in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Daten und kann folglich als zeit- und kosteneffizientes Werkzeug zur Entwicklung von neuen Elektrodenmaterialien/-strukturen mit verbesserter Gasaustragsfähigkeit verwendet werden.



// Für die Simulationen aufbereitetes Nickelschaumoberflächennetz (a) eines 2,2 x 2,5 mm² großen Ausschnitts aus einer μ-CT-Aufnahme (b).
 // Nickel foam surface mesh prepared for the simulations (a) from a 2.2 x 2.5 mm² section of a μ-CT scan (b).

// Christian Bergbreiter
 E-mail: christian.bergbreiter@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-201

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

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECS betreibt seit 20 Jahren ein Testzentrum mit inzwischen 25 vollautomatisierten Testständen von 0,1 bis 160 kW zur professionellen Rund-um-die-Uhr-Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stacks, -Systemen und -Systemkomponenten. Zur Bewertung der Qualität, z. B. des Leistungsverhaltens, und von Alterungsvorgängen von Brennstoffzellen-Stacks stehen umfangreiche Analytik sowie komplexe Methoden zur Fehleranalyse zur Verfügung.

Bei der Entwicklung von Brennstoffzellen-Systemen und Systemkomponenten für stationäre Anlagen, Bordstrom- und Notstromversorgungen oder Fahrzeugsysteme fließen viele Jahre Forschungsarbeit ein. Das Leistungsspektrum umfasst komplette Prototypen einschließlich der Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Daneben werden Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien oder Produktzertifizierungen, meist in Industrieprojekten, durchgeführt.

Einen neueren Schwerpunkt der Arbeiten bildet das Thema Wasserstoff als Kraftstoff. Das Fachgebiet mit seinem tiefen Verständnis in der Brennstoffzellentechnik und damit in der Nutzung von Wasserstoff ist durch mehrere Projekte in den Aufbau der europäischen Wasserstoff-Infrastruktur eingebunden. Hierbei geht es um die Einhaltung internationaler Betankungsprotokolle für Wasserstofftankstellen (SAE J2601/ CEP) bezüglich der Abnahme nach DIN ISO 19880 und der Einhaltung der für den Brennstoffzellenbetrieb notwendigen Wasserstoffqualität gemäß ISO 14687-2.

// Our main focus

For 20 years, the ECS research department has been operating a test centre with meanwhile 25 fully automated test benches from 0.1 to 160 kW for professional 24/7 operation characterisation of fuel cell stacks, systems and system components. Comprehensive analysis and complex methods for failure analysis are available for evaluating the performance behaviour and ageing processes of fuel cell stacks.

Many years of research have gone into developing fuel cell systems and system components for stationary systems, on-board and emergency power supplies or vehicle systems. The scope of services encompasses complete prototypes, including their control and hybridisation with batteries and DC/AC converters. In addition, safety assessments, packaging studies or product certification for industry partners are another major topic area.

A more recent focus of the work has been on hydrogen as a 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 verifying international refuelling standards for hydrogen refuelling stations (SAE J2601/ CEP) with regard to their acceptance pursuant to DIN ISO 19880 and ensuring compliance with the hydrogen quality required for fuel cell operation pursuant to ISO 14687-2.

// Mit dem Projekt „HyLab“ werden deutschlandweit Wasserstoffproben von der Erzeugung bis zur Abgabe an Tankstellen analysiert.
// The HyLab project is analysing hydrogen samples throughout Germany, from the production to the delivery at fuelling stations.

// Spurenanalytik für H₂ nach internationalem Standard

Mit Wasserstoff (H₂) betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge ermöglichen eine emissionsfreie Elektromobilität mit großen Reichweiten und kurzen Betankungszeiten. An Tankstellen abgegebener Wasserstoff kann Verunreinigungen enthalten, die Brennstoffzellen schädigen können. Die zulässigen Grenzwerte sind in dem internationalen Standard ISO 14687-2 definiert. In Deutschland existierte bisher kein unabhängiges Labor, um diese anspruchsvollen Analysen durchzuführen.

Mit dem vom Bundesverkehrsministerium geförderten Projekt „HyLab – Entwicklung und Aufbau von zwei unabhängigen Laboren zur Wasserstoffqualitätsmessung gemäß internationaler Standards“ wurden die Analytiklabore der Projektpartner ZSW in Ulm und ZBT in Duisburg erweitert, um künftig Wasserstoff aus Tankstellen deutschland- und europaweit überprüfen zu können. Im ersten Schritt wurden geeignete Analysemethoden und optimierte Probenentnahmeverfahren zum Nachweis der Standards evaluiert, beschafft und in Betrieb genommen. Die Validierung der hochsensitiven Geräte erfolgte durch eigens entwickelte dynamische Kalibrationsverfahren bis in den ppb-Bereich (Teile pro Milliarde).

Für eine qualitativ hochwertige Spurenanalytik ist die Prozesskette von der Konditionierung der Behälter über die eigentliche Probenahme bis einschließlich der Übergabe an die Analysatoren entscheidend. Die neuen Labore wurden hierfür entsprechend ausgerüstet (s. Abb. oben). Ferner werden Wasserstoffproben von der Erzeugung bis zur Abgabe an Tankstellen entnommen, analysiert und die bestimmenden Leitverunreinigungen erarbeitet. Abschließend folgen Vergleichsmessungen mit anderen internationalen Laboren. Alle Arbeiten erfolgen in enger Abstimmung mit Normungsgremien und dem assoziierten Partner Clean Energy Partnership (CEP), vgl. Seite 11.

// Trace analysis for H₂ according to international standards

Fuel cell vehicles powered by hydrogen (H₂) enable emission-free electromobility with long operating ranges and short refuelling times. Hydrogen delivered to fuelling stations may contain impurities that could damage fuel cells. The permissible limit values are defined in the ISO 14687-2 international standard. In Germany, no independent laboratory previously existed to carry out these complex analyses.

As part of the “HyLab – Development and construction of two independent laboratories for measuring hydrogen quality according to international standards” project funded by the German Federal Ministry of Transport, the analytical laboratories at the ZSW and ZBT project partners in Ulm and Duisburg were therefore expanded to be able to test hydrogen from fuelling stations in Germany and Europe. In the first step, suitable analysis methods and optimised sampling methods to verify the standards were evaluated, procured and put into operation. The highly sensitive instruments were validated using dynamic calibration procedures developed in-house down to the ppb range (parts per billion).

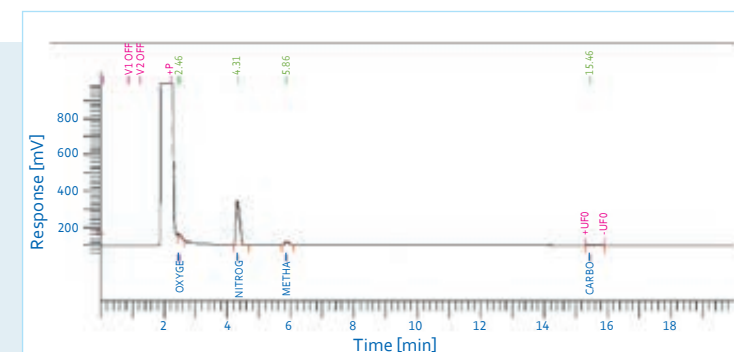
For high-quality trace analysis, the process chain from conditioning the containers and the actual sampling to the transfer to the analysers is decisive. The new laboratories were accordingly equipped for this (see fig. above). In addition, hydrogen samples will be taken from the production to the delivery at fuelling stations, analysed and the key impurities determined. Comparative measurements with other international laboratories will then be carried out. All the work is being carried out in close coordination with standards bodies and the associated Clean Energy Partnership CEP partner (see page 11).



„Langfristig sind die weltweiten Klimaziele ohne Wasserstofftechnologien nicht zu erreichen. Nun müssen wir lernen, den Wasserstoff in unseren Alltag zu integrieren.“

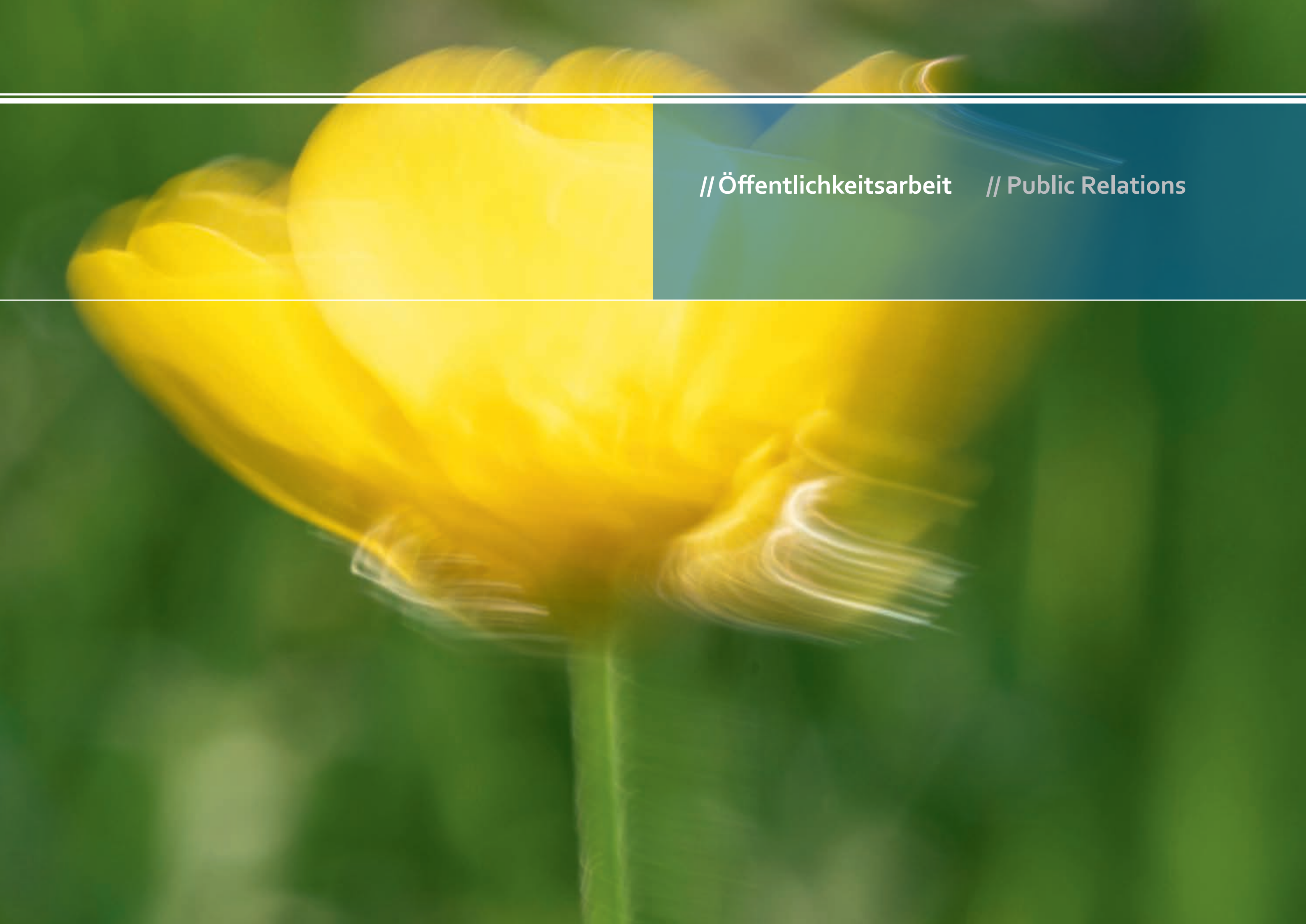
// Dr. Alexander Kabza, Head of Department
E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-832

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



// Exemplarisches Gas-Chromatogramm einer H₂-Analyse.
// Exemplary of a gas chromatogram of an H₂ analysis.

// Markus Jenne
E-mail: markus.jenne@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-821



// Öffentlichkeitsarbeit // Public Relations



Innovationen sind oftmals ebenso interessant wie komplex. Darum informiert das ZSW 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, die Energieversorgung von morgen zu gestalten. Der folgende Rückblick vermittelt einen Eindruck von unseren Veranstaltungen und unserer Medienarbeit im Jahr 2018.

Innovations are often as complex as they are exciting. This is why ZSW explains the new technologies needed for the energy transition to businesses, politics and the larger society in a transparent and objective way. After all, only those who understand these innovations can evaluate them and support their practical application and thereby contribute to shaping the energy supply of tomorrow. The following review will offer an impression of our events and our media work in 2018.

// Workshop IW-CIGSTech 9 zu CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen
Die kommerzielle Fertigung von CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen (CIGS) macht große Fortschritte. Über aktuelle Optimierungen der Modultechnologie und weitere Potenziale diskutierten rund 170 Experten der internationalen Hersteller- und Zulieferindustrie, des Maschinenbaus und der Forschung am 18. Juni auf dem Workshop IW-CIGSTech 9 in Stuttgart. Er wird jährlich vom ZSW und dem Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB) veranstaltet. Der Jubiläumsworkshop IW-CIGSTech 10 findet in Zusammenarbeit mit dem französischen Institut IPVF am 23./24. Mai 2019 in Paris statt.

// Workshop IW-CIGSTech 9 on CIGS thin-film solar modules
The commercial production of CIGS thin-film solar modules (CIGS) is making good headway. Around 170 experts from the international manufacturing and supply industry, mechanical engineering and research discussed the latest optimisations in module technology as well as its untapped potential at the IW-CIGSTech 9 workshop in Stuttgart on 18 June. This is organised annually by ZSW and the Helmholtz Centre Berlin for Materials and Energy (HZB). The anniversary workshop IW-CIGSTech 10 will take place in cooperation with the French institute IPVF in Paris on 23–24 May 2019.



// Internationaler Dünnschicht-Workshop IW-CIGSTech 9.
// International thin-film workshop IW-CIGSTech 9.



// Besuch der dänischen Energieagentur zur Energieeffizienz in Gebäuden.
// Visit of the Danish Energy Agency on the topic of energy efficiency in buildings.



// Teilnehmerinnen und Teilnehmer beim Kick-off des Verbundprojekts „LINOx BW“.
// Participants at the kick-off of the joint project LINOx BW.

// Verbundprojekt „LINOx BW“ gestartet
Am 19. November wurde das Verbundprojekt „LINOx BW“ gestartet. Im Projekt sind 16 der 24 Kommunen in Baden-Württemberg beteiligt, in denen die Grenzwerte für Stickoxide (NOx) überschritten werden. Das Projekt wird im Rahmen des Sofortprogramms „Saubere Luft“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Ziel ist es, durch den vermehrten Einsatz von Elektrofahrzeugen die verkehrsbedingten Schadstoffemissionen in Städten und Ballungsräumen zu verringern. Der Städtetag Baden-Württemberg ist Projektkoordinator und führt zusammen mit dem Verband Region Stuttgart, den Forschungspartnern Institut Stadt | Mobilität | Energie (ISME), dem ZSW sowie dem assoziierten Partner e-mobil BW GmbH (Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg) das Projekt durch.

// Joint project LINOx BW launched
The joint project LINOx BW was launched on 19 November. The project involves 16 of the 24 municipalities in Baden-Württemberg in which the maximum allowed values for nitrogen oxides (NOx) are being exceeded. The project is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) as part of the Clean Air immediate action programme. The aim is to reduce traffic-related pollutant emissions in cities and urban agglomerations by promoting the use of electric vehicles. Städtetag Baden-Württemberg is the project coordinator and is carrying out the project together with Verband Region Stuttgart, the research partners Institut Stadt | Mobilität | Energie (ISME), ZSW and the associated partner e-mobil BW GmbH (State Agency for New Mobility Solutions and Automotive Baden-Württemberg).

// Besuch von Umweltminister Untersteller
Franz Untersteller, Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft in Baden-Württemberg, besuchte mit einer Delegation seines Ministeriums am 24. Januar das ZSW Stuttgart und informierte sich über den Stand der Energieforschung. Nach der Präsentation zur konkreten Ausrichtung landesgeförderter Projekte aus den Bereichen Photovoltaik, Windenergie, Elektromobilität und Systemanalyse nutzte Minister Untersteller die Gelegenheit für die fachliche Diskussion mit den Wissenschaftlern. Im Anschluss blieb noch Zeit für einen Rundgang durch den Institutsneubau und die Besichtigung der Labore.

// Visit by Environment Minister Untersteller
Franz Untersteller, Minister for the Environment, Climate and Energy Industry in Baden-Württemberg, visited ZSW Stuttgart on 24 January with a delegation from his ministry to pick up the latest news on the current state of energy research. Following the presentation on the specific development of state-funded projects in the fields of photovoltaics, wind energy, e-mobility and systems analysis, Minister Untersteller used the opportunity to engage in technical discussions with the scientists. Afterwards, there was still time for a tour of the new institute building and the laboratories.



// ZSW-Vorstandsmitglied Prof. Powalla erläutert Umweltminister Untersteller und seinem Team die Forschungsaktivitäten im Bereich CIGS-Dünnschicht-Photovoltaik.
// ZSW board member Prof. Powalla outlined research activities in the field of CIGS thin-film photovoltaics to Environment Minister Untersteller and his team.



// Besuch des ungarischen Ministers für Innovation und Technologie, Dr. László Palkovic (Mitte).
// Visit of the Hungarian Minister of Innovation and Technology, Dr. László Palkovic (centre).



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Finanzstaatssekretärin Gisela Splett bei der Besichtigung der Photovoltaik-Fassade am ZSW Stuttgart. (v. l. n. r.: M. Schmidt, ZSW; ZSW-Vorstand Prof. F. Staiß; Finanzstaatssekretärin G. Splett; P. Lechner, ZSW)
// State Secretary of Finance Gisela Splett during the inspection of the photovoltaic façade at ZSW Stuttgart. (f. l. t. r.: M. Schmidt, ZSW; ZSW board member Prof. F. Staiß, State Secretary of Finance G. Splett; P. Lechner, ZSW)

// Besuch von Finanzstaatssekretärin Splett

Staatssekretärin Gisela Splett informierte sich am 8. März, begleitet von Kollegen aus der Vermögens- und Hochbauverwaltung, über die fassadenintegrierte Photovoltaikanlage am ZSW in Stuttgart. Die vertikale Anlage am ZSW gilt als Vorzeigeprojekt. Splett ist überzeugt: „Photovoltaikanlagen an Fassaden haben Zukunft.“ Davon sind auch die Wissenschaftler am ZSW überzeugt: In ihrem laufenden Forschungsprojekt sollen die Gebäudefassaden als Markt für die vom ZSW maßgeblich entwickelte CIGS-Dünnschichttechnik erschlossen werden, damit das PV-Erzeugungspotenzial in Deutschland für die Energiewende vollständig genutzt werden kann.

// Wirtschaftsstaatssekretärin Katrin Schütz überreicht ZSW Förderbescheide über 2,65 Millionen Euro

Staatssekretärin Katrin Schütz kam am 24. April persönlich zur Übergabe der Bewilligungsbescheide ans ZSW und nutzte diese Gelegenheit, um landesgeförderte Projekte der Fachgebiete zu besichtigen. Bewilligt wurde das Forschungsprojekt zu Perovskit-Solarzellen in Höhe von rund 1,05 Millionen Euro, an dem das ZSW und Partner-Institute aus der Innovationsallianz Baden-Württemberg innBW beteiligt sind. Mit weiteren rund 1,6 Millionen Euro wird am Institutsteil Stuttgart die Anschaffung eines neuen Raster-elektronenmikroskops für die CIGS-Dünnschicht-Forschung ermöglicht. In Ulm soll das Sicherheits- und Testzentrum für Batterien für zukünftige Anforderungen aufgerüstet werden.

// Visit by State Secretary of Finance Splett

On 8 March, State Secretary Gisela Splett, accompanied by colleagues from the state administration for property and building construction, gathered information about the façade-integrated photovoltaic system on the ZSW building in Stuttgart. The vertical system on the ZSW building is considered a showcase project. Splett is convinced: "Photovoltaic systems on façades have a future." The researchers at ZSW are likewise convinced: in their ongoing research project, building façades are to be developed as a market for CIGS thin-film technology, which has been decisively developed by ZSW, so that the PV generation potential in Germany can be fully exploited for the energy transition.

// State Secretary for Economic Affairs Katrin Schütz presents ZSW funding approvals for 2.65 million euros

State Secretary Karin Schütz personally presented ZSW with the official approval notices on 24 April and used this opportunity to take a look at state-sponsored department projects. The research project on perovskite solar cells, in which ZSW and partner institutes from the Innovation Alliance Baden-Württemberg innBW are involved, was approved and granted approximately 1.05 million euros. A further 1.6 million euros will be used to purchase a new scanning electron microscope for CIGS thin-film research at the Stuttgart branch of the institute. In Ulm, the safety and test centre for batteries is to be upgraded for future requirements.



// Überreichung der Förderbescheide durch Wirtschaftsstaatssekretärin Katrin Schütz (v. l. n. re. Dr. Michael Specht, Dr. Wiltraud Wischmann und Vorstandsmitglied Prof. Frithjof Staiß, ZSW, Georg Haag und Staatssekretärin Schütz, Wirtschaftsministerium, sowie Maïke Schmidt, ZSW).
// Presentation of the funding approvals by State Secretary for Economic Affairs Katrin Schütz (f. l. t. r.: Dr. Michael Specht, Dr. Wiltraud Wischmann and board member Prof. Frithjof Staiß, ZSW, Georg Haag and State Secretary Schütz, Ministry for Economic Affairs, as well as Maïke Schmidt, ZSW).



// Praxistag Elektromobilität in Stuttgart mit anschließender Besichtigung des Elektrofahrzeugs Streetscooter.
// E-mobility Action Day in Stuttgart, followed by a viewing of the Streetscooter electric vehicle.

// Praxistag Elektromobilität

Das ZSW führte in Zusammenarbeit mit Emobility Experts das vom Verkehrsministerium Baden-Württemberg geförderte Forschungsprojekt EmoGeFlott zu Potenzialen und Einsatzmöglichkeiten von Elektrofahrzeugen in gewerblichen Flotten durch. Als eine wichtige Erkenntnis der Studie kristallisierte sich heraus, dass es auf Seiten der Verbraucher einen großen Bedarf an herstellerunabhängiger Information zum Thema Elektromobilität gibt. Dies nahm das ZSW zum Anlass, mittelständische Handwerksbetriebe und Dienstflotteninhaber zum Praxistag Elektromobilität am 17. März an das ZSW Stuttgart einzuladen. Über 30 Teilnehmer nutzten die Gelegenheit, sich über die Alltagstauglichkeit von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Einsatz sowie über konkrete Fördermöglichkeiten zu informieren. Ein i-Tüpfelchen zum Abschluss: Lokale Autohändler stellten Elektrofahrzeuge zur kostenfreien Probefahrt zur Verfügung.

// Aktionstag zur neuen Straßenbahnlinie in die Ulmer Wissenschaftsstadt

Die Wissenschaftsstadt Ulm ist ein Zentrum für Forschung, Entwicklung und Anwendung von Energietechnologien und Mobilitätskonzepten – und seit 8. Dezember elektrisch auch per Straßenbahn erreichbar. Am Aktionstag stellten sich die Anrainer der Strecke der Öffentlichkeit vor. In der Helmholtzstraße ging es um Batterieforschung und die Frage, wie sich Wasserstoff und Brennstoffzellen für eine nachhaltige Mobilität einsetzen lassen. Die Universität Ulm, das Helmholtz-Institut Ulm (HIU), das ZSW sowie das Weiterbildungszentrum für innovative Energietechnologien der Handwerkskammer Ulm (WBZU) boten Vorträge, Führungen und Praxisdemonstrationen, u. a. Wasserstoffbetankungen und Probefahrten mit den Brennstoffzellenfahrzeugen des ZSW.



// E-mobility Action Day

In cooperation with E-mobility Experts, ZSW carried out the EmoGeFlott research project examining the potentials and possible uses of electric vehicles in commercial fleets. The project was funded by the Baden-Württemberg Ministry of Transport. An important finding of the study was that there is a great consumer demand for manufacturer-independent information on electric mobility. This prompted ZSW to invite medium-sized trade businesses and service fleet owners to the E-mobility Action Day on 17 March at ZSW Stuttgart. More than 30 participants took the opportunity to find out more about the suitability of electric vehicles for everyday commercial use and concrete funding opportunities. The icing on the cake: local car dealers provided electric vehicles for free test drives.

// Event day for the new tram line to the Science City of Ulm

The Science City of Ulm is a centre for the research, development and application of energy technologies and mobility concepts – and since 8 December, it has also been electrically accessible by tram. On the day of the event, the neighbouring organisations presented themselves to the public. In Helmholtzstrasse, the focus was on battery research and the question of how hydrogen and fuel cells could be used for sustainable mobility. The University of Ulm, the Helmholtz Institute Ulm (HIU), ZSW and the Education and Training Centre Ulm for Innovative Energy Technologies (WBZU) offered lectures, guided tours and hands-on demonstrations, including hydrogen refuelling and test drives with ZSW fuel cell vehicles.



// Aktionspunkt „Mobilität der Zukunft“ zur Einweihung der Straßenbahnlinie 2 in Ulm.
// Event "Mobility of the future" for the inauguration of tram line 2 in Ulm.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Rund 300 Teilnehmer besuchten die 16. UECT.
// Around 300 participants attended the 16th UECT.



// Themenboot des Ulmer ZSW-Teams beim größten Ulmer Feiertag Schwörmontag mit dem „Nabada“ (schwäbisch für Hinunterbaden) auf der Donau.
// Themed boat of the Ulm ZSW team at the biggest Ulm holiday Schwörmontag with the “Nabada” parade (Swabian word used to describe the custom of rowing boats and rafts, often themed, down a river on Schwörmontag) on the Danube.

// Ausstellungen und Messen 2018:

Hannover Messe Industrie	23.–27.4.2018
Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	25.–27.4.2018
Intersolar Europe, München	20.–22.6.2018
Global Connect, Stuttgart	1.+2.7.2018
35. European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brüssel	24.–28.9.2018
16. Ulm Electrochemical Talks (UECT), Ulm	13.+14.11.2018

// Exhibitions and trade fairs 2018:

Hannover Messe – Industry	23–27/4/2018
Symposium Photovoltaic Solar Energy Bad Staffelstein	25–27/4/2018
Intersolar Europe, Munich	20–22/6/2018
Global Connect, Stuttgart	1–2/7/2018
35 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Brussels	24–28/9/2018
16 th Ulm Electrochemical Talks (UECT), Ulm	13–14/11/2018

// Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist weiterhin sehr erfolgreich, nicht zuletzt aufgrund der attraktiven Themen aus Stuttgart und Ulm. 2018 wurde insgesamt 2.736 Mal über das Institut berichtet – das ist erneut das beste Ergebnis seit Beginn der Zählung im Jahr 2006. Auch 2018 war das ZSW mehrmals in den wichtigsten regionalen und überregionalen Leitmedien wie *Süddeutsche Zeitung*, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, *Wirtschaftswoche*, *Stuttgarter Zeitung*, *Handelsblatt*, *VDI-Nachrichten* und *SWR* vertreten.

// Media relations

ZSW’s media work remains successful, not least because of the attractive topics from Stuttgart and Ulm. In 2018, ZSW was reported about 2,736 times – the best ever result since counting started in 2006. Also in 2018, ZSW was repeatedly mentioned in major regional and national mainstream media outlets such as *Süddeutsche Zeitung*, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, *Wirtschaftswoche*, *Stuttgarter Zeitung*, *Handelsblatt*, *VDI-Nachrichten* and *SWR*.

// Hannover Messe 2018 – ZSW im Baden-Württemberg-Pavillon

Zum 18. Mal zeigte das ZSW seine Kompetenzen einem Fachpublikum aus aller Welt auf der Hannover Messe vom 23. bis 27. April. Die Kernthemen des Baden-Württemberg-Pavillons in der MobiliTec Area der Leitmesse ENERGY (Halle 27) waren hybride und elektrische Antriebe, mobile und stationäre Energiespeicher, alternative Kraft- und Brennstoffe sowie ganzheitliche Mobilitäts-technologie-Lösungen. Das ZSW positionierte sich mit den Themen Batterien und Brennstoffzellen.

// Hannover Messe 2018 – ZSW in the Baden-Württemberg Pavilion

For the 18th time, ZSW presented its expertise to an expert audience from all over the world at the Hannover Messe from 23 to 27 April. The main topics of the Baden-Württemberg pavilion in the MobiliTec Area of the leading ENERGY trade fair (Hall 27) were hybrid and electric drives, mobile and stationary energy storage systems, alternative fuels and holistic mobility technology solutions. ZSW highlighted its battery and fuel cells expertise.

// 16. Ulmer Elektro-Chemische Tage

Die Automobilindustrie rechnet bis 2025 mit einem jährlichen Produktionsvolumen von rund 20 Millionen Elektroautos. Und für all diese Fahrzeuge müssen Batterien und Brennstoffzellen produziert werden. Die 16. Ulmer Elektrochemischen Tage (UECT) vom 13. bis 14. November thematisierten die drängendsten Fragen zu Produktion, Recycling, Rohstoffen, Energiebilanzen und neuen Materialien – von der Verkehrswende mit Wasserstoff bis hin zu Anforderungen an elektrische Flugzeuge mit Batterien und Brennstoffzellen. Staatssekretär Steffen Bilger, Parlamentarischer Staatssekretär beim Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und Koordinator der Bundesregierung für Güterverkehr und Logistik, eröffnete die Konferenz. Mit rund 300 Teilnehmern aus aller Welt war die UECT wieder sehr gut besucht.

// 16th Ulm Electrochemical Talks

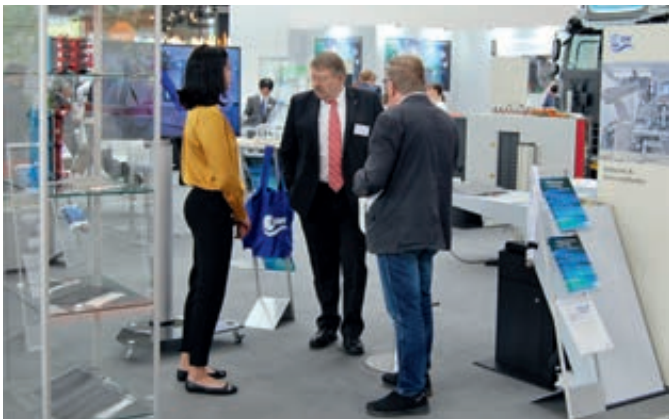
The automotive industry expects an annual production volume of around 20 million electric cars by 2025. Batteries and fuel cells will have to be produced for all of these vehicles. The 16th Ulm Electrochemical Talks (UECT) from 13 to 14 November focussed on the most pressing issues relating to production, recycling, raw materials, energy balances and new materials – from renewable mobility with hydrogen to requirements for electric aircraft with batteries and fuel cells. State Secretary Steffen Bilger, Parliamentary State Secretary to the Federal Minister of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) and Federal Government Coordinator for Freight Transport and Logistics, opened the conference. With around 300 participants from all over the world, the UECT was once again very well attended.

// Ulmer Imagefilm online

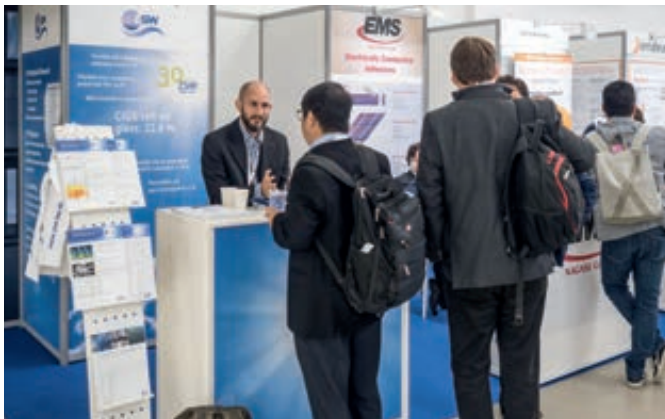
Erneuerbare Energien sind im Alltag angekommen. Für eine stabile und sichere Stromversorgung und emissionsfreie Mobilität sind effiziente Speichertechnologien entscheidend. Das ZSW in Ulm ist ein international führendes Forschungsinstitut mit 30 Jahren Erfahrung mit den Forschungsthemen Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstoff. Um dem Interessenten in wenigen Minuten einen Einblick zu ermöglichen, haben wir unseren Imagefilm aktualisiert – in bester Auflösung und mit modernster Technik: www.zsw-bw.de/mediathek.html

// Ulm promotional film online

Renewable energy sources have finally arrived in everyday life. Efficient storage technologies are crucial for reliable and secure power supply and emission-free mobility. ZSW in Ulm is a leading international research institute with 30 years of experience in the areas of batteries, fuel cells and hydrogen. We have updated our promotional film in order to offer interested parties some insight in just a few minutes – in the best resolution and with state-of-the-art technology: www.zsw-bw.de/mediathek.html



// Stand zu den Themen Batterien und Brennstoffzellen des ZSW auf der Hannover Messe am Baden-Württemberg-Pavillon.
// ZSW stand on the topic of batteries and fuel cells at the Hannover Messe in the Baden-Württemberg pavilion.



// Die Photovoltaik-Experten des ZSW netzwerken auf der 35. EU-PVSEC in Brüssel.
// ZSW’s photovoltaics experts networking at the 35th EU-PVSEC in Brussels.



// Dokumentation

// Documentation

// Finanzielle Entwicklung

Financial Development



// Einnahmen – Ausgaben

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 39,6 Mio. Euro und damit unter dem Niveau des Vorjahres, weil im Vorjahr die letzte Tranche eines langfristigen Darlehens für den Institutsneubau in Stuttgart in Anspruch genommen wurde.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2018 um 0,1 Mio. auf 4,7 Mio. Euro.

// Revenue – expenditure

The income volume for ordinary business activities amounted to 39.6 million euros in the past year, which was therefore below the level of the previous year. This is because the previous year included the last tranche of a long-term loan for the new institute building in Stuttgart.

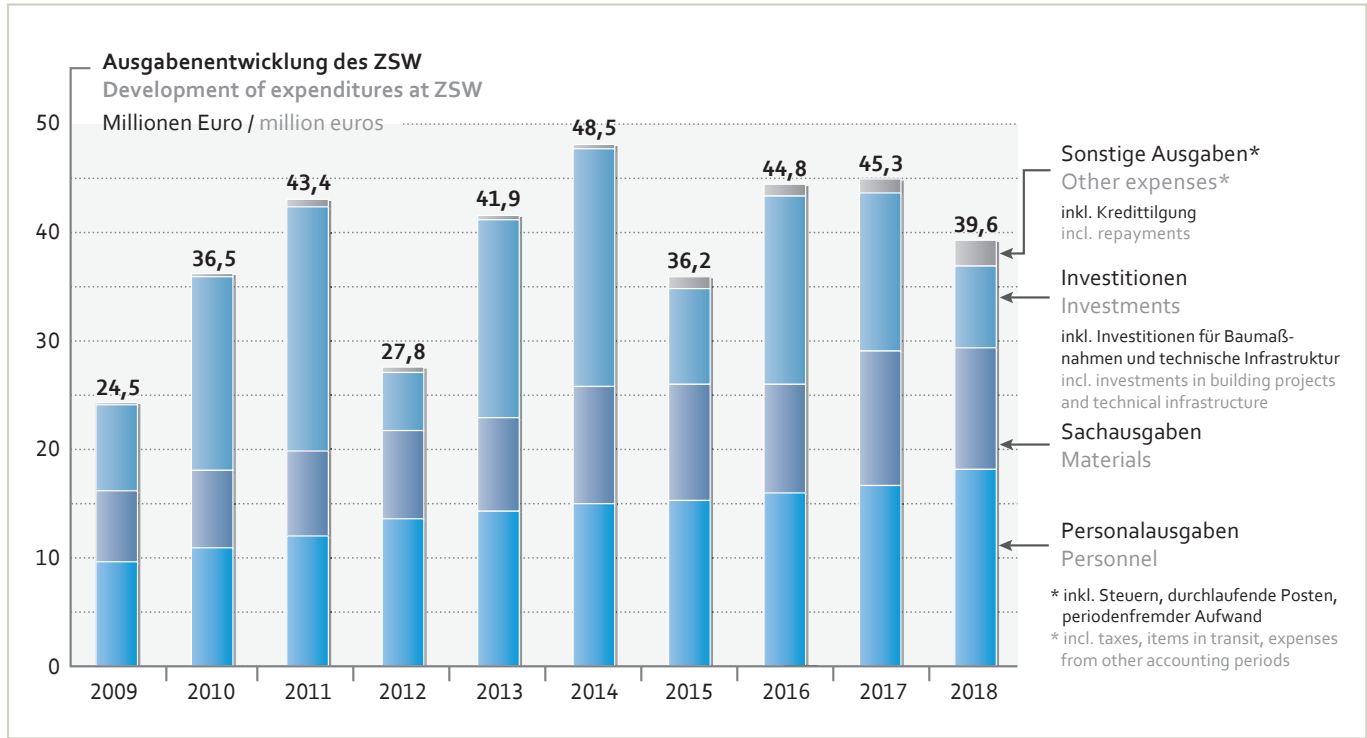
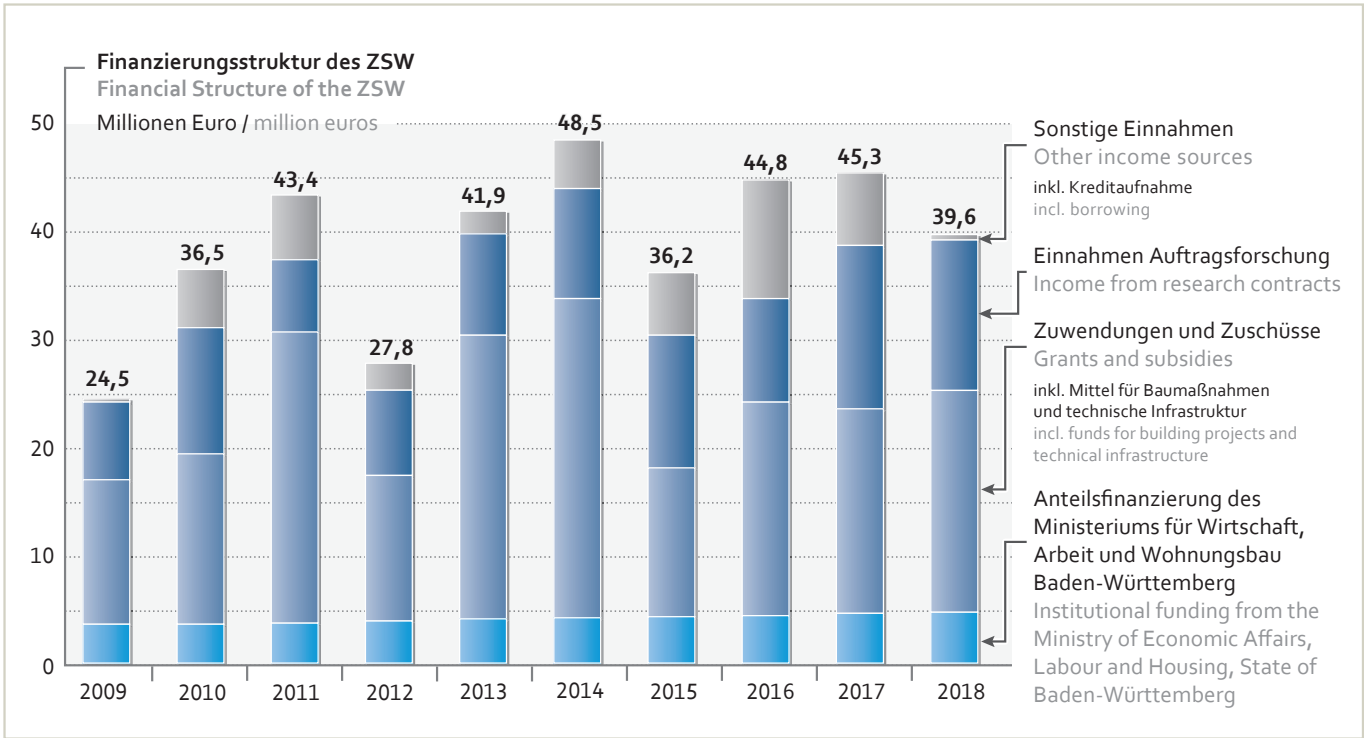
The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased by 0.1 million to 4.7 million euros in 2018.

Das Ausgabevolumen reduzierte sich im Berichtsjahr korrespondierend auf 39,6 Mio. Euro, weil die Investitionsausgaben durch die Fertigstellung des Institutsneubaus in Stuttgart zurückgingen.

Die Personalausgaben stiegen aufgrund einer Tarifierhöhung und eines Anstiegs der Personalkapazität.

The expenditure volume correspondingly reduced in the reporting year to 39.6 million euros, as investment expenditure decreased due to completion of the new institute building in Stuttgart.

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



// 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 gegenüber dem Vorjahr von 219 Vollzeitstellen auf 232 erhöht. Das entspricht einer Mitarbeiterzahl von 253. Mit einem Anteil von 83 % 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 13 verschiedenen Ländern kamen.

Der Frauenanteil lag bei 21 %. Das ZSW bemüht sich, 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 25 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt rund 150 Beschäftigte teilnahmen. Darüber hinaus standen im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements am ZSW Angebote zu den Themen Bewegung, Stressprävention, Ernährung und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm.

// 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 219 to 232 full-time equivalents in 2018. This corresponds to 253 employees. With 83% of all staff active in the scientific and technical area, productivity remains at a stable high level.

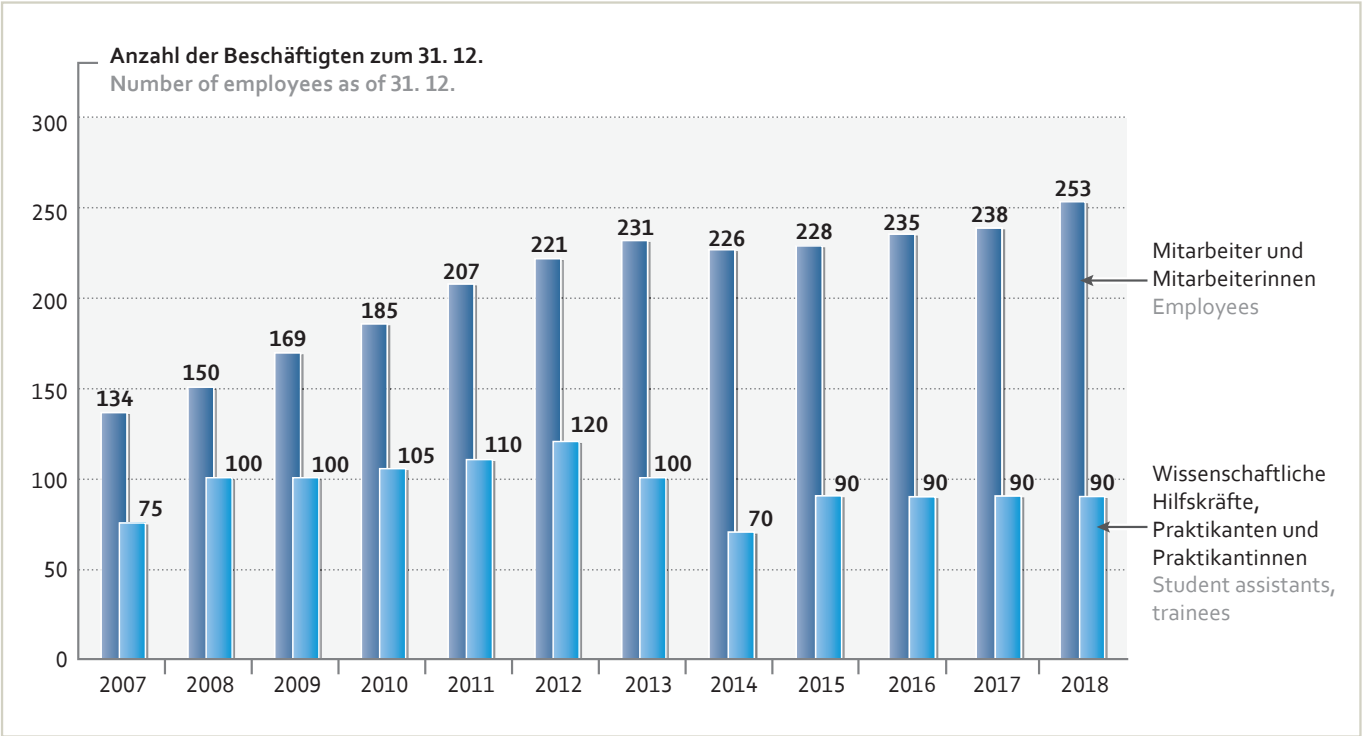
ZSW is also attractive to scientists from abroad. For example, a good 10% of all employees had a foreign nationality, they came from 13 different countries.

Women constitute 21% 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 which 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 25 events were held, with a total of about 150 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.

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 2018 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 90 Studierende und Praktikanten am ZSW beschäftigt. Im Berichtsjahr fertigten 22 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 90 students and interns in 2018. In the reporting year, 22 doctoral candidates completed their doctoral theses.



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications



// Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften

Publications in Books and Journals

/ Balasubramanian P., Mancini M., Geßwein H. (KIT), Geiger D. (Univ. Ulm), Axmann P., Kaiser U. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Kinetics and structural investigation of layered $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ as a cathode material for Li-ion batteries**; ChemElectroChem 2018, 5, 201-202; <http://dx.doi.org/10.1002/celc.201700734>

/ Baldinelli A. (Univ. Perugia), Dou X. (HIU), Buchholz D. (HIU), Marinaro M., Barelli L. (Univ. Perugia); **Adressing the energy sustainability of biowaste-derived hard carbon materials for battery electrodes**; Green Chemistry 20 (2018), 1527-1539; <http://dx.doi.org/10.1039/C8GC00085A>

/ Berckmans G. (Univ. Brussel), De Sutter L. (Univ. Brussel), Kersys A. (JRC), Kriston A. (JRC), Marinaro M., Kasper M., Axmann P., Smekens J. (Univ. Brussel), Wohlfahrt-Mehrens M., Pfrang A. (JRC), Jaguement J. (Univ. Brussel), Van Mierlo J. (Univ. Brussel), Omar N. (Univ. Brussel); **Electrical characterization and micro x-ray computed tomography analysis of next-generation silicon alloy lithium-ion cells**; World Electric Vehicle Journal 9 (2018) 34; <https://dx.doi.org/10.3390/wevj9030043>

/ Bozorgchenani M. (Univ. Ulm), Fischer P., Schnaidt J. (Univ. Ulm), Diemant T. (Univ. Ulm), Schwarz R., Marinaro M., Wachtler M., Jörissen L., Behm J. (Univ. Ulm); **Electrocatalytic oxygen reduction and oxygen evolution in Mg-free and Mg-containing ionic liquid 1-butyl-1-methylpyrrolidinium bis (trifluoromethanesulfonyl) imide**; ChemElectroChem, 2018, 5, 2600-2611; <https://doi.org/10.1002/celc.201800508>

/ Buchmann T., Hain D. (Aalborg Univ.), Kudic M. (Univ. Bremen), Müller M. (Univ. Hohenheim); **Endogeneous dynamics of innovation networks in the German automotive industry: Analyzing structural network evolution under stochastic actor-oriented approach**; International Journal of Computational Economics and Econometrics, Jan. 2018 Vol. 8, Issue 3-4, pp. 325-344

/ Buchmann T., Schmidt M., Staiß F.; **Technologische Lücken schließen: innovative Lösungen für die Energiewende**; GAIA 27/2 (2018) p. 253; <http://dx.doi.org/10.14512/gaia.27.2.15>

/ Buchmann T., Wolf P.; **Breakthrough inventions in solar PV and wind technologies: identification and explanation**; Technological Forecasting & Social Change, 2018; <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3216500>

/ Fischer P., Reinsberg P. (Univ. Bonn), Schwarz R., Marinaro M., Wachtler M., Diemant T. (Univ. Ulm), Behm J. (Univ. Ulm), Baltruschat H. (Univ. Bonn), Jörissen L.; **Electrochemical formation and characterization of surface blocking layers on gold and platinum by oxygen reduction in $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ in DMSO**; Journal of the Electrochemical Society, 165 (10) A2037-A2046 (2018); <http://dx.doi.org/10.1149/2.1311809jes>

/ Kannan A. (TUD), Kaczerowski J., Kabza A., Scholta J.; **Operation strategies based on carbon corrosion and lifetime investigations for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stacks**; Fuel Cells 18 (2018), 3, 287-298; <https://dx.doi.org/10.1002/fuce.201700096>

/ Kasinathan R., Marinaro M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of the molecular weight of poly-acrylic acid binder on performance of Si-alloy/graphite composite anodes for lithium-ion batteries**; Energy Technology 6 (2018) 2256-2263; <http://dx.doi.org/10.1002/ente.201800302>

/ Kartouzian D., Mohseninia A., Markötter H. (HZB), Scholta J., Manke I. (HZB); **Neutron tomographic investigation of the effect of hydrophobicity gradients within MPL and MEA on the spatial distribution and transport of liquid water in PEMFCs**; ECS Transactions 2018, volume 85, issue 13, 927-934; <https://dx.doi.org/10.1149/08513.0927ecst>

/ Kirsch S. (VW), Schwarze L. (VW), Schmidt L. (VW), Scholz H. (VW), Haußmann J., Klages M., Scholta J., Markötter H. (HZB), Alrwashdeh S. (HZB), Manke I. (HZB), Müller B. (MPA); **Transient limiting current measurements for characterization of gas diffusion layers**; Journal of Power Sources, Vol. 402, 31 Oct. 2018, p. 237-245; <https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.09.003>

/ Kladroba A. (Stifterverband), Kudic M. (Univ. Bremen), Friz K. (Univ. Bremen), Buchmann T., Wolf P.; **Technologien statt Branchen: Eine Neuauswertung der FuE-Erhebung 2018**; AStA Wirtschafts- und Sozialstatistisches Archiv 12 (2), 2018, 87-104

/ Löschel A. (Univ. Münster), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F., Ziesing H.-J. (AGEB); **Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Stellungnahme zum sechsten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2016**; Berlin, Münster, Stuttgart, Juni 2018; www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stellungnahme-der-expertenkommission-zum-sechsten-monitoring-bericht.html

/ Memm M., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Water-based $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ -cathodes with good electrochemical performance by use of additives**; Electrochimica Acta, 260 (2018) 664-673; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2017.12.014>

/ Mohanta P., Regnet F., Jörissen L.; **Graphitized carbon: a promising stable cathode catalyst support material for long term PEMFC applications**; Materials 2018, 11(6), 907; <https://doi.org/10.3390/ma11060907>

/ Pournemat A., Markötter H. (HZB), Wilhelm F., Enz S., Kropf H. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Nano-scale Monte Carlo study on liquid water distribution within the polymer electrolyte membrane fuel cell microporous layer, catalyst layer and their interfacial region**; Journal of Power Sources Vol 397 (2018), p. 271-279; <https://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.027>

/ Pournemat A., Wilhelm F., Haußmann J., Vierrath S. (Univ. Freiburg), Thiele S. (Univ. Freiburg), Scholta J.; **A steady-state Monte Carlo Study on the effect of structural and operating parameters on liquid water distribution within the microporous layers and the catalyst layers of PEM fuel cells**; Journal of the Electrochemical Society, 165 (13) F1092-F1097 (2018); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0861813jes>

/ Pournemat A., Wilhelm F., Scholta J.; **Effect of current density and operating parameters on the dynamical evolution of liquid water distribution within the gas diffusion layers of PEMFC using a multiscale kinetic Monte Carlo method**; ECS Transactions, 86 (13) 37-50 (2018); <https://dx.doi.org/10.1149/08613.0037ecst>

/ Powalla M., Paetel S., Ahlswede E., Würz R., Wessendorf C., Magorian Friedlmeier T.; **Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -, and perovskite-based materials**; Applied Physics Reviews, online 31 Dec. 2018; <https://dx.doi.org/10.1063/1.5061809>

/ Püttner A., Schill W.-P. (DIW), Diekmann J. (DIW); **Bundesländervergleich Erneuerbare Energien**; BWK, Bd. 70 (2018), Nr. 3 S. 44-47

/ Quinn J., Waldmann T., Richter K., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Energy density of cylindrical Li-ion cells - A comparison of commercial 18650 to the 21700 cells**; Journal of the Electrochemical Society, 165 (14) A3284-A3291 (2018); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0281814jes>

/ Reddy K., Fischer P., Marinaro M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Improved Li-metal cycling performance in high concentrated electrolytes for Li- O_2 batteries**; ChemElectroChem 2018, 5, 2758-2766; <https://doi.org/10.1002/celc.201800686>

/ Richter K., Waldmann T., Memm M., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Communication - Detection of Si distribution in Si/C composite anodes by Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy**; Journal of the Electrochemical Society, 165 (16) A3602-A3604 (2018); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0071816jes>

/ Schindler S. (HIU), Bauer M., Cheetamun H., Danzer M.; **Fast charging of lithium-ion cells: Identification of aging-minimal current profiles using a design of experiment approach and a mechanistic degradation analysis**; Journal of Energy Storage, Volume 19, October 2018, Pages 364-378; <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2018.08.002>

/ Schmidt M., Latz A. (DLR), Friedrich A. (DLR), Vetter M. (ISE), Littwin M. (ISFH), Knoop M. (ISFH), Puchta M. (IEE), Groß B. (IZES), Guillon O. (FZJ), Fattakhova D. (FZJ), Dotzauer P. (ZAE), Ehrenberg H. (KIT); **Stromspeicher im Energiesystem der Zukunft**; FVEE-Themen; Innovationen für die Energiewende, Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2017, Berlin, April 2018

/ Schwarz S., Zuberbühler U., Schmidt M., Kretzschmer J. (DBFZ), Friedrich A. (DLR), Schröer R. (IEE); **Power-to-X: Technologien für Übermorgen?!**; FVEE-Themen; Innovationen für die Energiewende, Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2017, Berlin, April 2018

/ Waldmann T., Hogg B., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – A review**; Journal of Power Sources, Vol. 384, 30 April 2018, p. 107-124; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.02.063>

/ Wessendorf C., Hanisch J., Müller D., Ahlswede E.; **CdS as electron transport layer for low-hysteresis perovskite solar cells**; Solar RRL 2018, 2, 1800056; <http://dx.doi.org/10.1002/solr.201800056>

/ Witte W., Jackson P., Buecheler S. (Empa), Carron R. (Empa), Siebentritt S. (Univ. Luxembourg), Werner F. (Univ. Luxembourg), Duguay S. (Univ. Rouen), Vilalta-Clemente A. (Univ. Rouen), Menozzi R. (Univ. Parma), Sozzi G. (Univ. Parma), Bourgeois E. (IMEC), Degustis G. (IMEC), Bär M. (HZB), Kunze T. (HZB), Sadewasser S. (INL), Nicoara N. (INL), Puska M. (Aalto Univ.), Malitckaya M. (Aalto Univ.), Tiwari A. (Aalto Univ.); **Towards the next generation of high-efficiency $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin-film solar cells – Sharc25**; Photovoltaics International, Vol. 41, Sept. 2018

/ Würz R., Hempel W., Jackson P.; **Diffusion of Rb in polycrystalline $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ layers and effect of Rb on solar cell parameters of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin-film solar cells**; Journal of Applied Physics 2018 124, 165305 (2018); <https://dx.doi.org/10.1063/1.5044629>

/ Yoon D., Marinaro M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Quantitative analysis of consumption of fluoroethylene carbonate additives on silicon alloy anodes**; Journal of the Electrochemical Society 165 (2018) A2467-A2469; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0301811jes>

// **Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien**
Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

/ Bauer M., Becher D., Liu X., Frieß B. (Daimler), Döring H.; **Mechanical and thermal behaviour of lithium-ion cells and resulting requirements on pack design**; 3M Fachforum Faszination Elektromobilität, Neuss, 27.-28.11.2018

/ Bauer M., Schindler S. (HIU), Cheetamun H., Danzer M.; **Schnellladung und deren Einfluss auf die Lebensdauer**; Battery Experts Forum, Aschaffenburg, 27.2.-1.3.2018

/ Becher D., Bauer M., Döring H., Frieß B. (Daimler), Danzer M.; **Limiting thermal runaway propagation in lithium-ion battery packs using phase-change materials**; Electrochemistry 2018, Ulm, 24-26 Sept. 2018

/ Becher D., Frieß B. (Daimler), Döring H., Bauer M.; **Silicone als Sicherheits- und Elastomerelemente in Lithium-Ionen-Batterien**; Expertenforum Technische Silicone, Burghausen, 26.-27.9.2018; <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14136.19209>

/ Becher D., Liu X., Bauer M., Döring H., Frieß B. (Daimler), Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Experimental determination of total heat and reaction energy of large lithium-ion cells during thermal runaway**; 16th UECT – Ulm Electro Chemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018; <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20515.71203>

/ Böse O.; **Ni(OH)₂ based aqueous asymmetric condensator with increased energy density**; 8th AABC Europe, Mainz, 30 Jan. 2018

/ Braunwarth W.; **Forschungsproduktionslinie am ZSW: Erforschung seriennaher Herstellungsprozesse von Li-Ionen-Zellen**; Battery Experts Forum, Aschaffenburg, 27.2.-1.3.2018

/ Brinner A.; **Secondary energy carrier hydrogen – electronic gas production and state-of-the-art technology**; Kurzseminar für das Korea Institute of Energy Research, Stuttgart, 18.10.2018

/ Buchmann T., Wolf P.; **Stimulating e-mobility diffusion in Germany: An agent-based simulation approach**; IWcee18 - VI International Workshop on Computational Economics and Econometrics, Rom, 26-28 June 2018

/ Buchmann T., Wolf P.; **Measuring plasticity of automotive innovation networks**; The 4th RA [X] "Networks" Workshop, Budapest, 15-16 Nov. 2018

/ Cheetamun H., Küber P., Klee Barillas J., Döring H., Bauer M.; **Analysis of ripple current effect on performance of lithium-ion cells**; Electrochemistry 2018, Ulm, 24-26 Sept. 2018

/ Cheetamun H., Liu X., Küber P., Klee Barillas J., Schmid A. (Daimler), Döring H.; **Impact of current ripple on performance and ageing of lithium-ion cells**; 16th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Döring H.; **Initializing of thermal runaway for Li-ion cells focusing on the effect of internal short circuit**; JRC Workshop Safer Li-Ion Batteries by Preventing Thermal Propagation, Petten, 8-9 March 2018

/ Döring H., Wörz M., Rohozneanu O., Spachmann K., Klee Barillas J.; **Warum brennen Li-Ionen-Batterien und wie kann man Li-Batteriebrände am besten löschen?**; Forum Brandschutz von PV-Heimspeichern, Bad Staffelstein, 24.4.2018



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

/ Felder M., Sehnke F., Ohnmeiß K., Schröder L., Kaifel A., Junk C. (UBIMET); **Probabilistic short term wind power forecasts using Deep Neural Networks with discrete target classes**; European Geosciences Union General Assembly (EGU) 2018, Vienna, 8-13 April 2018

/ Fischer P., Marinaro M., Bozorgchenani M. (Univ. Ulm), Schnaidt J. (Univ. Ulm), Diemant T. (Univ. Ulm), Reinsberg P. (Univ. Bonn), Behm R. (Univ. Ulm), Baltruschat H. (Univ. Bonn), Jörissen L.; **Quantification of discharge products in magnesium oxygen batteries**; 2nd International Symposium on Magnesium Batteries, Ulm, 27-28 Sept. 2018

/ Fischer P., Zaubitzer S., Kottam P., Marinaro M., Jörissen L.; **The oxygen reduction and evolution in CaTFSI₂/DMSO electrolytes**; Electrochemistry 2018, Ulm, 24-26 Sept. 2018

/ Fuchs B., Asante J., Böse O., Jörissen L.; **Exploring threefold specific energy in activated carbons for ultra high power applications**; 16th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Hanisch J., Wahl T., Schultes M., Hempel W., Ahlswede E.; **Detailed analysis of organometallic perovskite solar cells with ToF-SIMS using four different sputter sources**; SIMS Europe 2018, Münster, 16-18 Sept. 2018

/ Hempel W.; **Improved depth profiling of CIGS solar cells by adding nitrogen to argon sputter gas**; 1st Surface Fest, Bordeaux, 14 June 2018

/ Hempel W., Hanisch J., Friedlmeier T., Powalla M.; **3D-Imaging of Cu(In,Ga)Se₂ grain boundaries by Time-of-Flight-Secondary Ion Mass Spectrometry**; SIMS Europe 2018, Münster, 16-18 Sept. 2018

/ Hoffmann A., Gabrielli G., Jobst N., Klein A., Dreer C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Manufacturing of high power density blend cathodes for Li-ion batteries**; Battery Experts Forum, Aschaffenburg, 27.2.-1.3.2018

/ Hoffmann A., Gabrielli G., Jobst N., Klein A., Dreer C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Schnellladung und Alterung von Lithium-Ionenbatterien – ein Blick in die Zelle**; Battery Experts Forum, Aschaffenburg, 27.2.-1.3.2018

/ Hoffmann A., Gabrielli G., Jobst N., Klein A., Dreer C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Composition, manufacturing process and operating parameters of blend cathodes for Li-ion batteries**; Kraftwerk Batterie, Münster, 9.-11.4.2018

/ Huschenhöfer D., Mieser J., Binder J., Speidel T. (ads-tec); **Increased utilization of residential PV-storage systems through locally charged battery electric vehicles**; 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium, Stockholm, 15 Oct. 2018

/ Kartouzian D., Mohseninia A., Markötter H. (HZB), Scholta J., Manke I. (HZB); **Neutron tomographic investigation of the effect of hydrophobicity gradients within MPL and MEA on the spatial distribution and transport of liquid water in PEMFCs**; 233rd ECS Meeting, Seattle, 18-17 May 2018

/ Kartouzian D., Mohseninia A., Markötter H. (HZB), Scholta J., Manke I. (HZB); **Neutron tomographic investigation of the effect of hydrophobicity gradients with MPL and MEA on the spatial distribution and transport of liquid water in PEMFCs**; 16th UECT – Ulm Electrochemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Kelm T.; **Solar policy in Germany**; Photovoltaica, International Renewable Energy Exhibition & Conference, Marrakesch, 13-15 Feb. 2018

/ Keppeler M.; **Schnelles Stapeln für die Massenfertigung von kostengünstigen und sicheren Li-Ionen-Zellen**; Batteriestatusseminar 2018, Köln, 10.-11.11.2018

/ Keppeler M., Rößler S., Tran H.-Y., Bruglachner H., Braunwarth W.; **New ultra-fast high-precision process for single-sheet electrode stacking in high-performance batteries**; 16th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Kiowski O., Hanisch J., Ott T. (HS Ulm), Walter T. (HS Ulm); **Accelerated aging of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells under dark anneal and electrical bias conditions**; 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikaloa, 10-15 June 2018; <http://dx.doi.org/10.1109/PVSC.2018.8548229>

/ Kogler W., Hanisch J., Schnabel T., Ahlswede E., Powalla M.; **Characterization of the fine-grained, carbon-rich layer in solution-based Cu₂ZnSn(S,Se)₄ solar cells and its impact on device performance**; 9th European Kesterite Workshop, Ghent, 28-30 Nov. 2018

/ Kogler W., Hanisch J., Schnabel T., Bauer A., Spiering S., Ahlswede E.; **Alternative buffer materials In₂S₃ and Zn(O,S) from different deposition techniques for Cu₂ZnSn(S,Se)₄ based solar cells**; EMRS Spring Meeting, Strasbourg, 18-22 June 2018

/ Lechner P., Schnepf J., Hummel S.; **Evaluation of PID chamber and field testing of CIGS modules**; 2018 NREL PV Reliability Workshop, Denver, 27 Feb. -1 March 2018

/ Lechner P., Schnepf J., Hummel S., Wirth H., Stellbogen D.; **Performance of long-term reliability testing of CIGS modules**; IW-CIGSTech-9, 9th International Workshop on CIGS Solar Technology, Stuttgart, 18 June 2018

/ Löffler, M.-S.; **Power-to-Hydrogen: Stand der Technik, Herausforderungen, Entwicklungsperspektiven**; Strategiedialog Automobilwirtschaft Baden-Württemberg, Expertenhearing Wasserstoff und Brennstoffzelle, Stuttgart, 17.4.2018

/ Marinaro M., Rössler S., Braunwarth W., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Advanced Li-ion cell chemistry: Scale-up approaches**; Next Generation of Competitive LIBs to meet customer expectations – made in Europe, Vienna, 19 April 2018

/ Marini E., Steininger M., Brimaud S., Evangelisti C., Jörissen L.; **Changes in the preparation route of alpha-MnO₂/C and resulting modifications in the ORR activity and selectivity in alkaline solution**; GDCh Electrochemistry Ulm, 24-26 Sept. 2018

/ Marini E., Steininger M., Brimaud S., Evangelisti C., Jörissen L.; **A comparative study of catalyst-support material synergies for secondary alkaline metal-air batteries**; AiMES 2018, Cancun, 30 Sept.-4 Oct. 2018

/ Matthiss B., Kraft M., Binder J.; **Fast probabilistic load flow for non-radial distribution grids**; 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering (IEEE EEEIC), Palermo, 12-15 June 2018

/ Matthiss B., Momenifarhani A., Ohnmeiss K., Felder M.; **Influence of demand and generation uncertainty on the operational efficiency of smart grids**; 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Paris, 14-17 Oct. 2018

/ Menner R., Friedlmeier T.; **Investigation of Indium Zinc Oxide (IZO) windows in high-efficiency Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; 7th International Symposium on Transparent Conductive Materials TCM 2018, Platanias, 14-19 Oct. 2018

/ Mohanta P., Regnet F., Jörissen L.; **Investigation of stable catalyst support materials for low temperature PEMFC**; Electrochemistry 2018, Ulm, 24-26 Sept. 2018

/ Mohanta P., Regnet F., Jörissen L.; **Influence of catalyst layer composition on MEA performance**; 16th UECT – Ulm Electrochemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Mohanta P., Ripa M., Regnet F., Jörissen L.; **Dependency of platinum loadings of the supported catalysts on electrochemical and MEA performances**; 16th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Mohseninia A., Kartouzian D., Eppler M., Regnet F., Markötter H. (HZB), Wilhelm F., Scholta J., Manke I. (HZB); **Examining tailored catalyst and micro-porous layer hydrophobicity and the effect on PEMFC water content and performance through neutron radiography**; 16th UECT – Ulm Electrochemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Nabitz L. (KIT), Scheer D. (KIT), Arnold A. (ZIRIUS), Schmidt M.; **Policy packages visited: Eine neue Perspektive für die Transformationsforschung**; 8. Internationale Konferenz des Netzwerks Technikfolgenabschätzung (NTA), Panel 3: Der Policy Package-Ansatz im Kopernikusprojekt E-Nav, 6.-8. 11.2018

/ Paetel S.; **Entwicklungen für die Produktion von CIGS-Solarmodulen**; VDMA EMINT Herbsttagung, Berlin, 12.9.2018

/ Paetel S., Friedlmeier T., Hempel W., Jackson P., Witte W., Würz R., Schöppe P. (Univ. Jena), Schönherr S. (Univ. Jena), Ronning C. (Univ. Jena), Schnohr C. (Univ. Jena), Wischmann W., Powalla M.; **Effects of alkali-PDT in high-efficiency Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Waikaloa, 10-15 June 2018

/ Pournemat A., Wilhelm F., Scholta J.; **Simulating the dynamic evolution of the liquid water distribution within the gas diffusion of PEMFCs employing a Multi-timescale Kinetic Monte Carlo Model**; 16th UECT – Ulm Electrochemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Rongstock R., Pfeiffer D. (Biberach Univ.), Toradmal A. (Reutlingen Univ.), Frank H. (Heilbronn Univ.), Binder J., Becker M. (Biberach Univ.), Thomas B. (Heilbronn Univ.); **District energy system optimisation and communication: A two-level approach**; 53rd International Universities Power Engineering Conference, Glasgow, 4-7 Sept. 2018

/ Rößler S.; **PHEV₁ – cell assembly: Quality assurance as key to high quality cells**; International Battery Production Conference (IBPC), Braunschweig, 14-16 Nov. 2018

/ Rößler S., Tran H.-Y., Braunwarth W.; **OptiFeLiO – PHEV₁-Zellen mit neuem Gehäuse**; Batterieforum Deutschland, Berlin, 24.-26.1.2018

/ Schnabel T., Kieferle M., Schultes M., Ahlswede E.; **Band gap tuning of Cu₂ZnGeS₄Se_{4-x} absorbers for thin-film solar cells**; EMRS Spring Meeting, Strasbourg, 18-22 June 2018

/ Schneider S., Wilhelm F., Scholta J., Jörissen L.; **Validation and modification of open source CFD-code OpenFOAM for simulation of PEMFCs**; 16th UECT – Ulm Electrochemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Schultes M., Giesbrecht N. (LMU), Küffner J., Docampo P. (LMU), Bein T. (LMU), Ahlswede E., Powalla M.; **Universal nanoparticle wetting agent for upscaling perovskite solar cells**; 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Brussels, 24-28 Sept. 2018

/ Specht M.; **eFuels – Herstellung strombasierter Kraftstoffe**; Plattform e-Mobilität, WBZU, Ulm, 12.7.2018

/ Specht M., Brellocks J., Marquard-Möllenstedt T.; **Ca-basiertes Wirbelschichtmaterial: Klärschlammverwertung mit prozessintegrierter Phosphor-Rückgewinnung**; DGMK-Arbeitskreis Kohlen- und Biomasse-veredlung, Stuttgart, 23.11.2018

/ Staiß F., Schmidt M.; **“Vision meets Reality” Passt das sozio-technische System zu den Stromzielen 2030?**; Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy (STRise), 2. Stuttgarter Energiedialog, Stuttgart, 9.11.2018

/ Tran H.-Y., Braunwarth W., Almar L. (KIT), Weber A. (KIT), Ivers-Tiffée E. (KIT); **Influence of the mixing process on the electrode quality**; 16th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2018, Ulm, 13-14 Nov. 2018

/ Tran H.-Y., Braunwarth W., Almar L. (KIT), Weber A. (KIT), Ivers-Tiffée E. (KIT); **Influence of the mixing process on the electrode quality**; International Battery Production Conference (IBPC), Braunschweig, 14-16 Nov. 2018

/ Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Potentiale und Limitationen bei der Schnellladung von Li-Ionen-Batterien auf Materialebene**; Batterieforum Deutschland, Berlin, 24.-26.1.2018

/ Wenske J., Matthiss B., Binder J., Speidel T. (ads-tec), Klaußer V. (Stadtwerke Nürtingen); **Hot-spot scenarios of electrical vehicles on the low voltage grid including statistics and effect of decentralized battery storage**; 2nd E-Mobility Power System Integration Symposium, Stockholm, 15 Oct. 2018

/ Wessendorf C.; **Life-cycle assessment (LCA) of perovskite PV (A review on available data)**; Perovskit-Workshop Baden-Württemberg, ZSW, Stuttgart, 20.11.2018

/ Wessendorf C., Schultes M., Hanisch J., Ahlswede E.; **Optimization of solution-processed Di-based lead free solar cells**; 10th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV), Benidorm, 28-31 May 2018

/ Witte W.; **R&D for Advancements in Science and Technology of CIGS (EU Sharc Project)**; IW-CIGSTech-9, 9th International Workshop on CIGS Solar Technology, Stuttgart, 18 June 2018

/ Witte W., Jackson P., Hariskos D., Kessler F., Powalla M., Buecheler S. (EMPA), Carron R. (EMPA), Avancini E. (EMPA), Bissig B. (EMPA), Weiss T. (EMPA), Löffinger J. (EMPA), Siebentritt S. (Univ. Luxemb.), Werner F. (Univ. Luxemb.), Wolter M. (Univ. Luxemb.), Pareige P. (Univ. Rouen), Duguay S. (Univ. Rouen), Cadel E. (Univ. Rouen), Castro C. (Univ. Rouen), Vilalta-Clemente S. (Univ. Rouen), Menozzi R. (Univ. Parma), Sozzi G. (Univ. Parma), Di Napoli S. (Univ. Parma), Bourgeois E. (IMEC), Degutis G. (IMEC), Gehlhaar J. (IMEC), Bär M. (HZB), Wilks R. (HZB), Kunze T. (HZB), Bombsch J. (HZB), Sadewasser S. (INL), Nicoara N. (INL), Puska M. (Aalto Univ.), Malitckaya M. (Aalto Univ.), Komsa H. (Aalto Univ.), Havu V. (Aalto Univ.), Reinhard P. (Flisom), Dimmler B. (NICE), Wächter R. (NICE), Tiwari A. (EMPA); **Characterization and new concepts at the Cu(In,Ga)Se₂/buffer interface: Results of the EU project Sharc25**; 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Brussels, 24-28 Sept. 2018

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cobalt free cathode materials for high energy lithium ion batteries**; IBA 2018- International Battery Materials Association, Jeju Island, 11-16 March 2018

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cobalt free cathode materials**; 11. ABAA – 11th International Conference on Advanced Lithium Battery for Automobile Application, Huzhou, 12-15 Oct. 2018

/ Wohlfahrt-Mehrens M., Waldmann T., Hogg B.-I., Kasper M., Axmann P.; **Lithium plating – A critical side reaction in lithium ion cells**; IMLB 2018 - International Meeting on Lithium Batteries, Kyoto, 17-22 June 2018

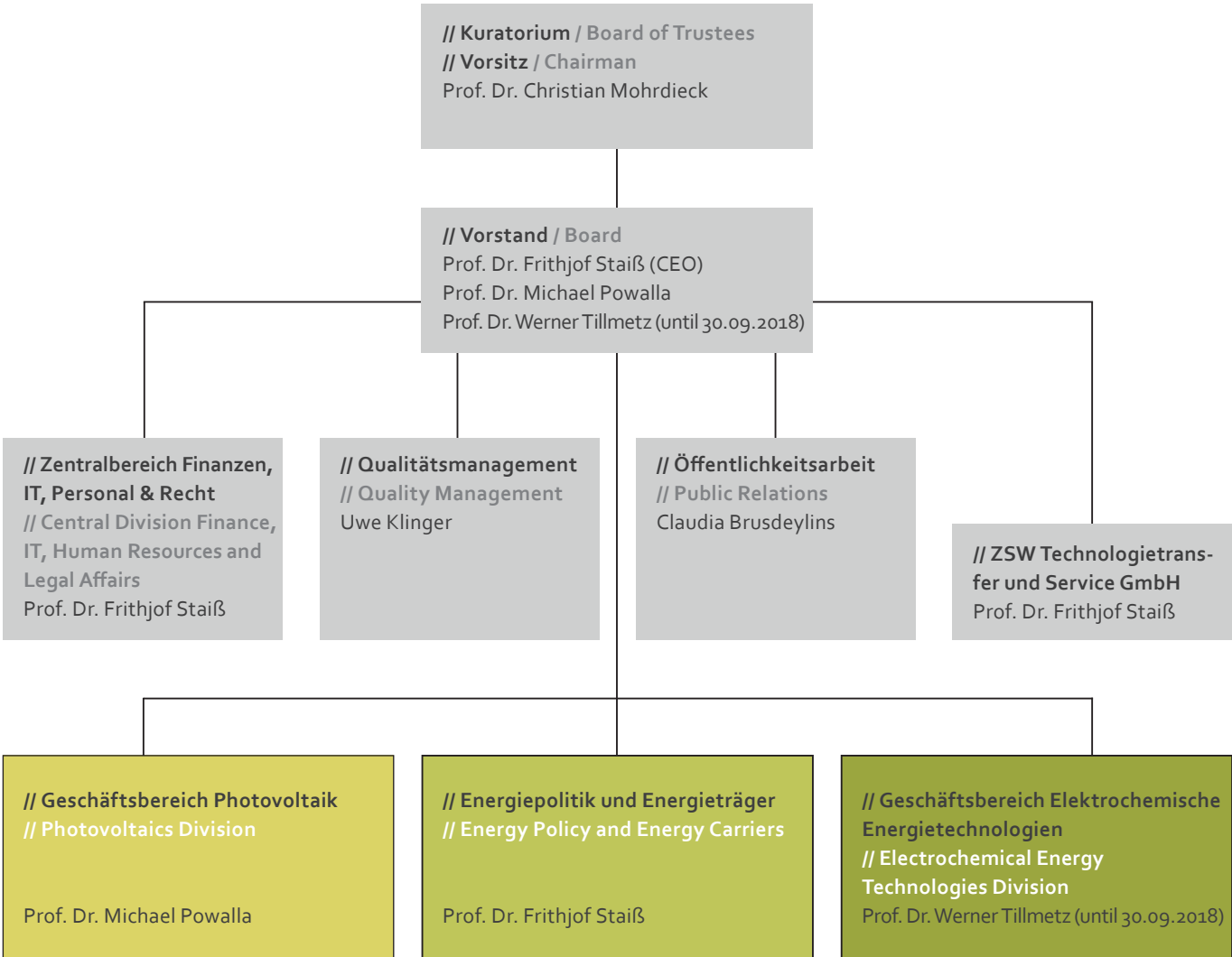
/ Würz R., Hempel W., Jackson P.; **Diffusion of Rb in polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ layers and effect of Rb on solar cell parameters of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; EMRS Spring Meeting, Strasbourg, 18-22 June 2018

/ Zuberbühler U., Specht M.; **Power-to-Gas (P2G*) Technologie für die Energiewende**; VBBW Verband der Bürgerenergiegenossenschaften, Netze BW GmbH, Kirchheim/Teck, 20.10.2018

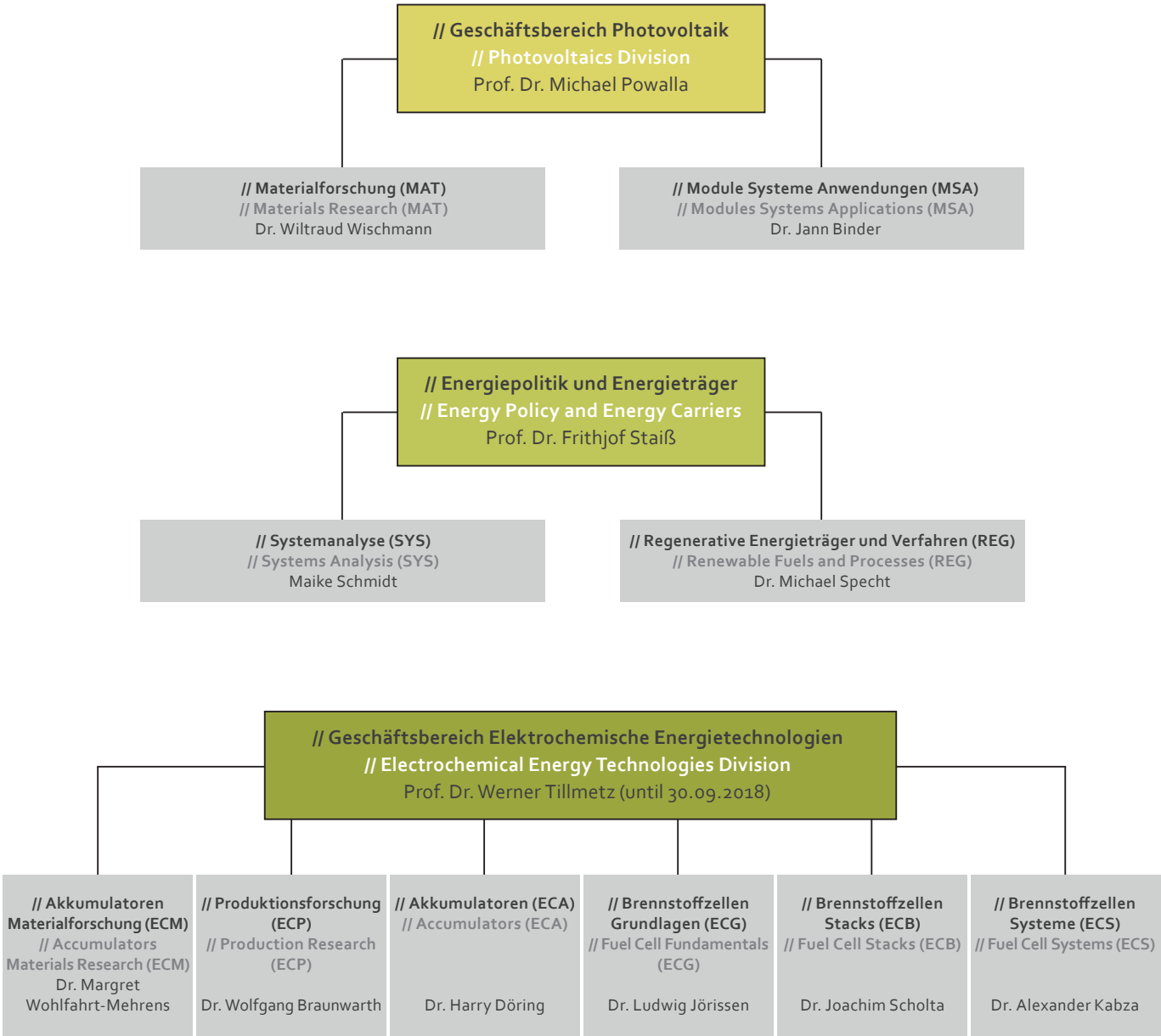
// Organigramme

Organisational Charts

// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart



// Organigramme der Geschäftsbereiche
// Organisational Charts of the Divisions



// Standorte

Locations

// Stuttgart



Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart

Ansprechpartner / 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

Ansprechpartner / 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

// Institute, Institutionen
// Institutes, Institutions

AABC	Advanced Automotive Battery Conference
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
AiMES	Americas International Meeting on Electrochemistry and Solid State Science
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
CELEST	Center for Electrochemical Storage Ulm & Karlsruhe
CEP	Clean Energy Partnership
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
ECS	Electrochemical Society
EEEIC	International Conference on Environment and Electrical Engineering
eLaB	ZSW Labor für Batterietechnologie / ZSW Laboratory for Battery Technology
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EMRS	European Materials Research Society
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
FZJ	Forschungszentrum Jülich GmbH
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
HIU	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
HS	Hochschule
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IEE	Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMEC	Interuniversity Microelectronics Center
INL	International Iberian Nanotechnology Laboratory
IPVF	Institut Photovoltaïque d'Île-de-France
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISFH	Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal
ISO	International Organization for Standardization
IZES	Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH
JRC	Joint Research Center
KIST	Korea Institute of Science and Technology
KIT	Karlsruher Institut für Technologie / Karlsruhe Institute of Technology
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien / Lithium-Ion Batteries Competence Network
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen- technologie GmbH / National Organisation for Hydrogen and Fuel Cell Technology
NREL	National Renewable Energy Laboratory
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development / Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
POLiS	Post Lithium Storage
SAE	Society of Automotive Engineers
TUD	Technical University of Denmark
UECT	Ulmer ElektroChemische Tage - Ulm ElectroChemical Talks
VDMA EMINT	Verband der Maschinen- und Anlagenbauer e. V. - Electronics, Micro and Nano Technologies
ZAE	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH
Zirius	Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung Universität Stuttgart

// Fachbegriffe
// Technical Terms

AC	Alternating Current / Wechselstrom
AEL	Alkalische Druckelektrolyse / Alkaline Pressure Electrolysis
BEV	Battery Electric Vehicle
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics / gebäudeintegrierte Photovoltaik
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CL	Catalyst Layer / Katalysatorschicht
CS	Charging Station / Ladestation
CT	Computertomographie / Computer Tomography
DC	Direct Current / Gleichstrom
DMSO	Dimethylsulfoxid
DSC	Dynamic Differential Scanning Calorimetry / dynamische Differenzkalorimetrie
ECSA	Electrochemically Active Surface Area / elektrochemisch aktive Oberfläche
F&E	Forschung und Entwicklung
FB	Fluidised Bed
FC	Fuel Cell / Brennstoffzelle
FLOX	Flammenlose Oxidation / Flameless Oxidation
FSTM	Fueling Station Test Module / Tankstellen-Testmodul
FuE	Forschung und Entwicklung
GDL	Gas Diffusion Layer / Gasverteilerschicht
HGV	Heavy Goods Vehicle
HT	Hochtemperatur / High-Temperature
HT-SOEL	High-Temperature Solid Oxide Electrolysis / Hochtemperaturelektrolyse
IP	Intellectual Property / geistiges Eigentum
KMC	Kinetisches Monte-Carlo (-Modell) / Kinetic Monte-Carlo (Model)
LGDE	Liquid and Gas Diffusion Electrode
MEA	Membrane Electrode Assembly / Membran-Elektroden-Einheit
MPL	Micro Porous Layer / mikroporöse Schicht
µ-CT	Mikro-Computertomographie / Micro-Computed Tomography
OER	Oxygen Evolution Reaction / Sauerstoffentstehung
ORR	Oxygen Reduction Reaction / Sauerstoffreduktion
P2G	Power-to-Gas
P2X	Power-to-X
PDT	Post Deposition Treatment
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran / Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell / Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PID	Potenzialinduzierte Degradation / Potential-Induced Degradation
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik - Photovoltaics
R&D	Research and Development
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
RMS	Root Mean Square / quadratisches Mittel
SEM	Scanning Electron Microscope
SIMS	Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie / Secondary Ion Mass Spectrometry
SNG	Substitute Natural Gas / Erdgassubstitut
SOC	State of Charge / Ladungszustand
STC	Standard Test Conditions
ToF	Time of Flight
VOF	Volume of Fluid
WtW	Well-to-Wheel

// Mitgliedschaften
// ZSW is a member of



AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AKK	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
Allianz BIPV	Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik
BDSH e.V.	Bundesverband Deutscher Sachverständiger des Handwerks e.V.
BVES	Bundesverband Energiespeicher
CPN	Clean Power Net
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband
ECS	Electrochemical Society
EERA	European Energy Research Alliance
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.
EUREC	European Renewable Energy Centres Agency
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
Hydrogen Europe	Hydrogen Europe Research
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien
performing energy	Fachkommission des DWV e.V. Power-to-Fuel
SmartGridsBW	Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V.
Solar Cluster	Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
Strategieplattform Power to Gas	(Deutsche Energie-Agentur GmbH)
STRise	Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy
UNW	Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e.V.
VDMA	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
Windcluster BW	Windcluster Baden-Württemberg
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süd
ZfES	Zentrum für Energieforschung Stuttgart

// 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
Annette Stumpf

// 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

Ulm eLaB

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

www.zsw-bw.de



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