
// Ergebnisse
Results

ZSW 2019

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / Our Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	Erfolge 2019 / Achievements in 2019
14	Schwerpunktbericht / Focus Report Wasserstoff: Zu Ende gedacht! Hydrogen: The time is right!
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.

// Genderhinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen in diesem Bericht die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.

// Note on the use of gender

To improve readability, the male gender is used to refer to all persons throughout this report. The corresponding terms serve to express the equal treatment of all genders. This use of language is for editorial reasons only and does not imply any valuation.

// Vorwort

Mit der Wahl des Europäischen Parlaments und der EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen wurde die Klimaneutralität bis spätestens 2050 zum Leitbild Europas, das mit dem Europäischen Green Deal umgesetzt werden soll. Der Klimaschutz stand auch beim Weltwirtschaftsforum in Davos Anfang 2020 erstmals ganz oben auf der Agenda. Von neuer Qualität war dabei, dass große Finanzinvestoren sehr dezidiert ambitioniertere Klimaschutzstrategien von der Politik einfordern.

Für eine klimaneutrale Weltwirtschaft spielen grüner Wasserstoff und grüne Kohlenwasserstoffe eine entscheidende Rolle: zur Substitution fossiler Energieträger, als internationales Handelsgut und als technologischer Zukunftsmarkt. Der Schwerpunkt „Wasserstoff: Zu Ende gedacht!“ unseres Jahresberichts greift dies auf und zeigt, wie das ZSW den Transformationsprozess unterstützt: mit der Entwicklung von Elektrolyseuren, der CO₂-Anreicherung aus Luft sowie Brennstoffzellen und deren praktischer Erprobung bis hin zur Analyse von Wertschöpfungsketten und Szenarien.

Der Jahresbericht präsentiert darüber hinaus weitere wissenschaftliche Highlights aus dem ZSW: die Forschungsfabrik HyFaB für Brennstoffzellen, die Herstellung kobaltfreier Elektrodenmaterialien für Batterien im 30-kg-Maßstab, die Optimierung komplexer Produktionsprozesse mit Künstlicher Intelligenz, Wirkungsgradsteigerungen bei CIGS-Perowskit-Tandemsolarzellen, den Stand unseres Windtestfeldes oder das 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

With the election of the European Parliament and EU Commission President Ursula von der Leyen, climate neutrality no later than 2050 has become a European policy guideline and will be implemented as part of the European Green Deal. For the first time, climate protection was a top priority at the World Economic Forum in Davos in early 2020. There was a new quality to the discussions, as major financial investors resolutely called for more ambitious climate protection strategies from policymakers.

Green hydrogen and green hydrocarbons have a crucial role to play in a climate-neutral global economy: as substitutes for fossil fuels, as international commodities and as a future technological market. The focus of our annual report "Hydrogen: The time is right!" picks up on this and shows how ZSW supports the transformation process: with the development of electrolyzers and extraction of CO₂ from air as well as fuel cells and their realistic testing up to analyses of value chains and scenarios.

The annual report also presents other scientific highlights achieved by ZSW: the HyFaB research factory for fuel cells, the production of cobalt-free electrode materials for batteries in the 30-kg range, the optimisation of complex production processes through artificial intelligence, efficiency increases in CIGS-perovskite tandem solar cells, the status of our wind energy test site and the monitoring of the energy transition at federal and state levels.

We are delighted about the continuing high level of interest in our work, apparent through many discussions and through pleasantly extensive coverage in the media. This is the achievement of all our employees, and the Board would first and foremost like to thank them for their outstanding commitment. Special thanks also go to the members of the Board of Trustees and its Chairman, Professor Christian Mohrdieck. We would also like to thank the Federal State of Baden-Württemberg for its financial support and excellent cooperation together with 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

// Stabwechsel



// Dr. Harry Döring

// Dr. Olaf Böse

// Changeover

Dr. Harry Döring, Leiter des Fachgebiets Akkumulatoren, verabschiedet sich nach 28 Jahren am ZSW, in denen er das Batterietestzentrum auf Erfolgsspur gebracht hat, in den Ruhestand. Er übergibt sein eingespieltes Team an den Chemiker und Experten für Lithium-Ionen-Batterien Dr. Olaf Böse, der 2014 mit 15 Jahren Forschungserfahrung aus der Industrie als Projektleiter ans ZSW wechselte.

Dr. Harry Döring, head of the Accumulators department, retired after 28 years of work at ZSW, during which he guided the Battery Test Centre on its road to success. He handed over his well-functioning team to the chemist and expert on lithium-ion batteries, Dr. Olaf Böse, who joined ZSW in 2014 as a project manager with 15 years of industrial research experience.

Nach über 31 Jahren am ZSW, davon 25 Jahre als Fachgebietsleiter, hat sich Dr. Michael Specht Ende 2019 in den wohlverdienten Ruhestand verabschiedet. Er übergibt die Leitung des Fachgebiets Regenerative Energieträger und Verfahren an Dr. Marc-Simon Löffler. Dieser war seit 2004 zunächst als Projekt- und dann als Gruppenleiter am ZSW tätig.

After more than 31 years at ZSW, 25 of which were spent as a department head, Dr. Michael Specht retired at the end of 2019. He handed over the reins of the Renewable Fuels and Processes department to Dr. Marc-Simon Löffler. Dr. Löffler has been working as a project manager and then as a group leader since 2004.



// Dr. Michael Specht

// Dr. Marc-Simon Löffler



// 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 Wissenschaften 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.

Unesco-Biosphärengebiet Schwäbische Alb.
Unesco Biosphere Reserve Swabian Alb.

// Stiftung

// Foundation

Natur- und Geopark Vulkaneifel.
Vulkaneifel Nature and Geopark.

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

Stiftungsauftrag:

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

Stifter des ZSW / The founders are

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

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

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

The goal of the foundation is:

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

Unternehmen / Commercial enterprises

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

// Mitglieder des Kuratoriums

// Members of the Board of Trustees

Vorsitzender / Chairman

- > Prof. Dr. Christian Mohrdieck

Stellvertreter / Vice Chairmen

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

Ministerien und Organisationen / Ministries and Organizations

- > 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, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

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, Concordia University Montréal
- > 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, Mercedes-Benz Fuel Cell GmbH
- > Prof. Dr. Wolfram Münch, Energie Baden-Württemberg AG
- > Dipl.-Ing. Roland Pröger, Fichtner GmbH & Co. KG
- > Dr. Günter von Au, gva consult
- > Dipl.-Ing. Gregor Waldstein, GWA Beteiligungs- und Management GmbH (bis Juni 2019/until June 2019)

// Erfolge 2019

// Achievements in 2019



// Erfolge 2019

// Achievements in 2019

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

Auch 2019 wurden wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

// UMWELTMINISTERIUM FÖRDERT FORSCHUNGS-FABRIK FÜR BRENNSTOFFZELLEN HYFAB

Die Mobilität von morgen soll klimaneutral und möglichst emissionsfrei sein. Wasserstoff und Brennstoffzellen bieten ein enormes Potenzial zur CO₂-Reduzierung im Verkehr – und für die nationale Wertschöpfung. Der Markt für Brennstoffzellenfahrzeuge umfasst den Bereich des Diesel (Reiselimousinen, Lkw, Busse etc.). Um die Technologie in großen Stückzahlen auf den Markt zu bringen, ist eine Industrialisierung der Produktion der Brennstoffzellenstacks (engl. stack = „Stapel“) nötig. Im Projekt HyFaB wird das ZSW in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und Akteuren aus Industrie und Forschung automatisierte Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren für Brennstoffzellen entwickeln. Dazu soll das ZSW in Ulm bis 2021 deutlich ausgebaut werden. Das Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg gab am 19. Dezember bekannt, die Vorhaben mit insgesamt 7,9 Mio. Euro zu fördern – 3,8 Mio. Euro gehen ans ZSW. Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg hat zusätzlich eine Förderung von gut 10 Millionen Euro in Aussicht gestellt.



“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 2019, excellent results were once again achieved in the key areas.

// MINISTRY OF THE ENVIRONMENT SUPPORTS HYFAB RESEARCH FACTORY FOR FUEL CELLS

Tomorrow's mobility ought to be as climate-neutral and emission-free as possible. Hydrogen and fuel cells offer enormous potential for cutting carbon dioxide emissions in transport – and for increasing national added value. The market for fuel cell vehicles includes the diesel sector (long-distance saloons, lorries and buses, etc.). Before the technology can be launched in large-scale quantities, the production of fuel cell stacks needs to be industrialised. In the HyFaB project, ZSW will develop automated manufacturing and quality assurance processes for fuel cells in cooperation with the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE and stakeholders in industry and research. The ZSW building in Ulm is to be significantly expanded for this purpose by 2021. On 19 December, Baden-Württemberg's Ministry for the Environment announced that the projects will be funded with a total of 7.9 million euros – 3.8 million euros of which is going to ZSW. Baden-Württemberg Ministry of Economics, Labour and Housing has also announced additional funding of around 10 million euros.



// Übergabe der Förderbescheide in Stuttgart.
// Presentation of the funding approvals in Stuttgart.
F.i.t.r.: Prof. Dr. Frithjof Staiß (ZSW), Ulf Groos (Fraunhofer ISE), Franz Untersteller (Umweltminister Baden-Württemberg), Dr. Ludwig Jörissen (ZSW), Prof. Dr. Christopher Hebling (Fraunhofer ISE).
Picture: Umweltministerium Baden-Württemberg



// Vor der Photovoltaikfassade: Umwelt-Staatssekretär Andre Baumann (re.) überreicht ZSW-Chef Frithjof Staiß die Plakette für die Auszeichnung „Ort voller Energie“.
// In front of the photovoltaic façade: State Secretary for the Environment Andre Baumann (right) presents Frithjof Staiß, CEO of ZSW, with the plaque for the “Ort voller Energie” (Place Full of Energy) award.
(Picture: Umweltministerium Baden-Württemberg/Parsyak)

// ZSW FÜR NACHHALTIGES GEBÄUDE AUSGEZEICHNET

Das ZSW ist am 24. Januar vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg als „Ort voller Energie“ ausgezeichnet worden. Der Grund für die Ehrung: Das Forschungsinstitut, das die Entwicklung klimaschonender Technologien vorantreibt, setzt sie auch im eigenen Gebäude ein. Damit zeige es vorbildhaft, wie die Energiewende erfolgreich umgesetzt werden kann, so das Ministerium. Erneuerbare Energien für die Strom-, Wärme- und Kälteversorgung decken einen großen Teil des Energiebedarfs der Büroflächen: eine Photovoltaikanlage mit CIGS-Dünnschichtsolarmodulen auf dem Dach und an der Fassade, Erdwärmesonden, eine Wärmepumpe sowie eine Betonkernaktivierung. Umwelt-Staatssekretär Dr. Andre Baumann überreichte als Auszeichnung eine Wandtafel mit der Aufschrift „Hier wird die Energiewende gelebt“. Bei der Ehrung mit dabei war auch Karl Greißing, Leiter der Abteilung Energiewirtschaft im Umweltministerium.

// WYHLEN GEWINNT DEN IDEENWETTBEWERB „REALLABORE DER ENERGIEWENDE“

Mit dem Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg (PtG-BW) wurde im südbadischen Grenzach-Wyhlen eine Elektrolyse-Referenzanlage für Wasserstoff (H₂) geschaffen. Der Power-to-Gas Standort ist einer der Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ des Bundeswirtschaftsministeriums. Der Standort soll erweitert werden, der regenerative Wasserstoff in den Sektoren Industrie und Mobilität genutzt und die anfallende Abwärme soll in ein Nahwärmenetz eingespeist werden. Das ZSW wird in dem Projekt neben dem Technologiemonitoring und einer systemanalytischen Begleitforschung insbesondere an der Industrialisierung der alkalischen Elektrolyse arbeiten. Das beinhaltet die Untersuchung von Materialien und Methoden, die eine Serienfertigung und Skalierung der Technologie erlauben, und die Erprobung von Funktionsmustern und Prototypen in der bestehenden F&E-Plattform.



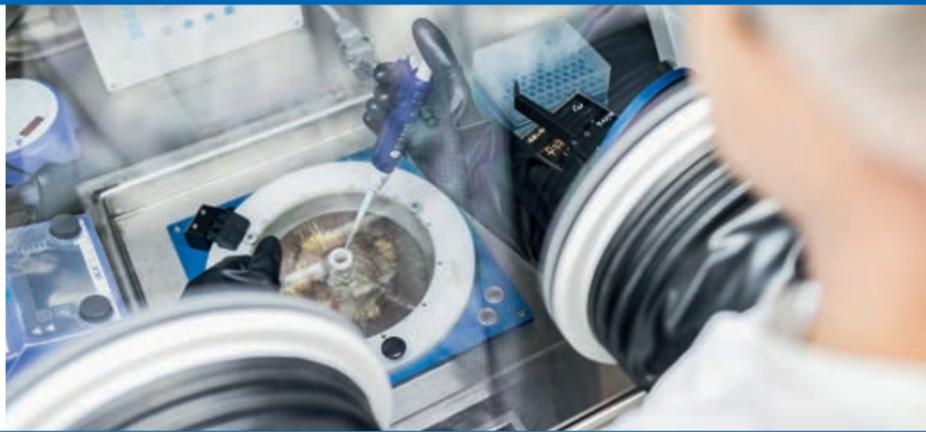
// ZSW DISTINGUISHED FOR SUSTAINABLE BUILDING

On 24 January, ZSW was awarded the denomination “Ort voller Energie” (place full of energy) by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector. The reason: the research institute that promotes the development of climate-friendly technologies also uses them in its own building. The Ministry stated that ZSW was leading by example, showing how the energy transition could be implemented successfully. Renewable energy sources for power, heating and cooling cover a large portion of the energy requirements of the office areas. These include a photovoltaic system with CIGS thin-film solar modules on the roof and façade, borehole heat exchangers, a heat pump and a concrete core activation system. State Secretary for the Environment Dr. Andre Baumann presented a plaque bearing the inscription “Hier wird die Energiewende gelebt” (this is where the energy transition is alive) as an award. Karl Greißing, head of the energy department in the Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector, was also present at the ceremony.

// WYHLEN WINS THE IDEA COMPETITION “REAL-WORLD LABORATORIES OF THE ENERGY TRANSITION”

A reference plant for hydrogen (H₂) electrolysis was constructed in Grenzach-Wyhlen in southern Baden as part of the flagship project Power-to-Gas Baden-Württemberg (PtG-BW). The power-to-gas site is one of the winners of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) idea competition “Real-world laboratories of the energy transition”. The site is to be expanded and its renewable hydrogen will be used in the industry and mobility sectors; the waste heat produced will be fed into a local heating network. ZSW will work on the industrialisation of alkaline electrolysis during the project, in addition to technology monitoring and accompanying systems analytical research. This includes examining materials and methods that would allow for volume production and scaling, as well as testing functional models and prototypes on the existing R&D platform.

// Kommerzielle Power-to-Gas-Anlage im Megawattmaßstab mit angebundenem Forschungselektrolyseur am Laufwasserkraftwerk Wyhlen (Südbaden).
// Commercial power-to-gas plant on a megawatt scale with connected research electrolyser at the run-of-river power plant Wyhlen (South Baden).
Picture: Energiedienst, Folk



// ZSW-Mitarbeiter bei der Präparation einer Perowskit-Solarzelle.
 // ZSW employee preparing a perovskite solar cell.

// DÜNNSCHICHTSOLARZELLEN ALS CIGS-PEROWSKIT-TANDEM ERREICHEN 23 %

Das ZSW entwickelt Stapelzellen aus den Dünnschicht-Absorbermaterialien CIGS und Perowskit, um die Effizienz der Dünnschicht-solarzellen weiter steigern zu können. Hierbei wandelt eine Perowskit-Zelle das Licht im sichtbaren Teil des Sonnenspektrums in Strom um, während das Licht im infrarotnahen Spektrum, das die Perowskit-Zelle durchdringt, von einer CIGS-Solarzelle aufgefangen wird. Ein vom Bundesforschungsministerium gefördertes Projekt CISOVSKIT mit Forschungspartnern vom KIT und der LMU München wurde 2019 erfolgreich beendet. Thema waren grundlegende Fragestellungen zur Entwicklung von Perowskit-Einzelzellen. Ein Erfolg ist eine mechanisch gestapelte Tandemsolarzelle mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 23 %. Die Aktivitäten werden seit Juli 2019 in dem vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekt CAPITANO in Zusammenarbeit mit Forschungs- und Industriepartnern fortgeführt. Darin ist auch die Entwicklung von Kleinmodulen vorgesehen.

// MIT KI WETTBEWERBSVORTEILE ERZIELEN

Die Herstellung von CIGS-Solarzellen umfasst zahlreiche komplexe Prozesse, die sich mit klassischen Analyseverfahren nur begrenzt erfassen und optimieren lassen. Mit Verfahren der künstlichen Intelligenz können weitere Verbesserungsoptionen erschlossen werden. Wissenschaftler aus dem Bereich Photovoltaik konnten mit Hilfe der am ZSW entwickelten KI-Werkzeuge in kurzer Zeit verstecktes Optimierungspotenzial bei der CIGS-Abscheidung aufspüren. Im Rahmen einer Ausschreibung des Landes war das ZSW mit dem Vorhaben „Regionales KI-Lab für Erneuerbare Energien“ (KILEE) erfolgreich. Das KILEE nimmt im April 2020 seine Arbeit auf und soll vor allem kleine und mittelständische Unternehmen in Baden-Württemberg dabei unterstützen, neue Dienstleistungen und Produkte mit KI-Methoden zu entwickeln.

// THIN-FILM CIGS PEROVSKITE TANDEM SOLAR CELLS REACH 23%

ZSW develops stacked cells made of the thin-film absorber materials CIGS and perovskite in order to further improve the efficiency of thin-film solar cells. A perovskite cell converts light in the visible part of the solar spectrum into electricity, while light in the near infrared spectrum that penetrates the perovskite cell is utilised by a CIGS solar cell. A project named CISOVSKIT, funded by the Federal Ministry of Education and Research and carried out with research partners from KIT and LMU Munich, was successfully completed in 2019. The focus was on fundamental questions concerning the development of perovskite single cells. One successful outcome is a mechanically stacked tandem solar cell with an electrical efficiency of 23%. Since July 2019, the efforts have been continued as part of the CAPITANO project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy in cooperation with research and industry partners. This includes the development of small modules.

// GAINING A COMPETITIVE EDGE WITH AI

The production of CIGS solar cells entails a number of complex processes that can only be identified and optimised to a certain degree with conventional analytical methods. Further potential for improvement can be accessed by applying artificial intelligence methods. With the aid of the AI tools developed at ZSW, scientists working in the field of photovoltaics were able to quickly discover hidden optimisation potential in CIGS deposition. ZSW was awarded the project "Regionales KI-Lab für Erneuerbare Energien" (KILEE) (Regional AI lab for renewable energies) by the state of Baden-Württemberg. The project will start in April 2020 and aims to support small and medium-sized enterprises in Baden-Württemberg in particular in their development of new services and products using AI methods.



// Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen können künftig auch die Herstellung von CIGS-Solarmodulen optimieren.
 // In the future, artificial intelligence and machine learning could also optimise the production of CIGS solar modules.



// Jubel für den Nobelpreisträger bei der 12. ABAA in Ulm:
 // Cheering for the nobel prize winner at the 12th ABAA in Ulm: (f. l. t. r.) Stefano Passerini (HIU), Mario Marinaro (ZSW), Alberto Varzi (ZSW), Gunter Czisch (OB Ulm), Stanley Whittingham (newly chosen Nobel Prize winner), Margret Wohlfahrt-Mehrens (ZSW), Khalil Amine (IALB), Thomas Waldmann (ZSW), Dominic Bresser (HIU), Heribert Wilhelm (HIU).

// 12. ABAA: 380 BATTERIEEXPERTEN TAGEN IN ULM

Mit der „12. Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications“ lockten ZSW und HIU vom 6. bis 9. Oktober rund 380 weltbekannte Wissenschaftler, hochrangige politische Entscheidungsträger aus Deutschland, Europa, Japan und den USA sowie Vertreter der Automobilindustrie, des Maschinenbaus und Material- und Zellhersteller nach Ulm, um über Entwicklungen zu Lithium-Ionen-Batterien zu diskutieren. Am Vortag der Konferenz gab es außerdem Besichtigungen der Batterielabore am ZSW und HIU. Die ABAA ist eine internationale Konferenz mit Tagungsorten über alle Kontinente hinweg. Die Tagungsleitung lag bei Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens (ZSW), Prof. Stefano Passerini (HIU) sowie Dr. Khalil Amine (IALB/Argonne National Laboratory, USA). Unter den Rednern befand sich der renommierte Chemiker M. Stanley Whittingham, der als einer der Väter der Lithium-Ionen-Technologie gilt und in Ulm von seinem Nobelpreis erfuhr.

// KOBALTFREIE LITHIUM-IONEN-BATTERIEN: 35 KG KATHODENMATERIAL HERGESTELLT

In den meisten Lithium-Ionen-Zellen wird kobalthaltiges Kathodenmaterial verwendet. Kobalt ist toxisch, nur begrenzt verfügbar und wird von der EU als kritischer Rohstoff eingestuft. Eine kobaltfreie Alternative ist ein Kathodenmaterial auf der Basis von Lithium-Nickel-Mangan-Oxid (LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O₄), das am ZSW schon seit einigen Jahren erforscht wird. Bisher lag das Material nur in kleinen Mengen vor. Bereits 2018 wurde ein Labor mit neuer Reaktortechnologie etabliert, mit dem Synthesen bis in den 10-kg-Maßstab erfolgten. Mittlerweile ist es dem ZSW gelungen, 35 kg kobaltfreies Kathodenmaterial mit exzellenten Pulvereigenschaften herzustellen. Diese Mengen sind notwendig, um Elektroden für große automobiltaugliche PHEV-1-Zellen (> 25 Ah) auf der Forschungsproduktionslinie (FPL) unter seriennahen Bedingungen zu beschichten und so die Funktionsfähigkeit des Materials in realen Zellen zu demonstrieren.

// 12th ABAA: 380 BATTERY EXPERTS CONVENE IN ULM

For the "12th Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications" from 6 to 9 October, ZSW and HIU were able to attract some 380 internationally renowned scientists, high-ranking political decision-makers from Germany, Europe, Japan and the United States, as well as representatives of the automotive industry, mechanical engineering and material and cell manufacturers to Ulm in order to discuss developments relating to lithium-ion batteries. There were also tours of the battery laboratories at ZSW and HIU the day before the conference. ABAA is an international conference with venues on all continents. The conference was headed by Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens (ZSW), Prof. Stefano Passerini (HIU) and Dr. Khalil Amine (IALB/Argonne National Laboratory, USA). Speakers included the renowned chemist M. Stanley Whittingham, who is regarded as one of the fathers of lithium-ion technology and who learned of his Nobel Prize award whilst in Ulm.

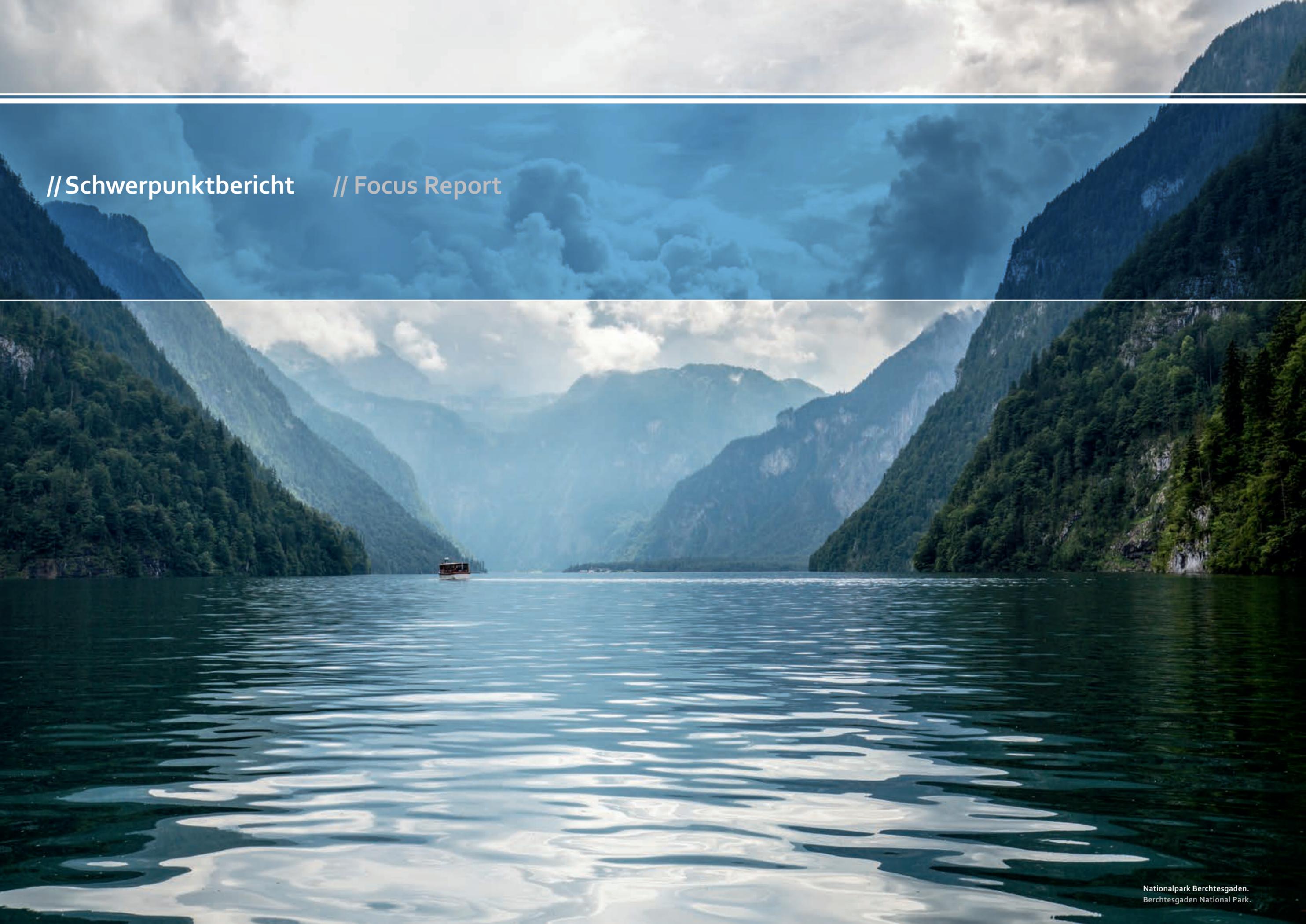
// COBALT-FREE LITHIUM-ION BATTERIES: 35 KG OF CATHODE MATERIAL PRODUCED

Most lithium-ion cells use a cathode material that contains cobalt. Cobalt is toxic, has a limited availability and is classified by the EU as a critical raw material. A cobalt-free alternative is a cathode material based on lithium nickel manganese oxide (LiNi_{0,5}Mn_{1,5}O₄), which has been researched at ZSW for several years now. Previously, the material had only been available in small quantities. As early as 2018, a laboratory with new reactor technology was established and carried out syntheses up to the 10 kg range so far. In the meantime, ZSW has managed to produce 35 kg of cobalt-free cathode material with excellent powder properties. These quantities are needed to coat electrodes for large automotive-grade PHEV-1 cells (> 25 Ah) on the research production line (FPL) under close-to-production conditions, thereby demonstrating the viability of the produced material in real cells.



// 35 kg kobaltfreies Kathodenmaterial hergestellt.
 // 35 kg of cobalt-free cathode material produced.

// Schwerpunktbericht // Focus Report



H2

// Wasserstoff: Zu Ende gedacht!

// Hydrogen: The time is right!

KLIMANEUTRALES EUROPA BIS 2050

A CLIMATE-NEUTRAL EUROPE BY 2050

Auf dem Weltwirtschaftsforum im Januar 2020 in Davos war der aktuelle „Global Risk Report 2020“ Grundlage der Diskussionen. Erstmals wurden die Klimakrise (Climate Action Failure) und ihre Folgen für die Weltwirtschaft für die nächsten zehn Jahre auf höchste Priorität gesetzt. Seitens der Europäischen Union wurde dies als Chance genutzt, den Europäischen Green Deal vorzustellen und zu skizzieren, wie Europa als erster Kontinent bis spätestens 2050 klimaneutral werden soll. Eine Hauptrolle spielt hierbei erstmals Wasserstoff (H₂).

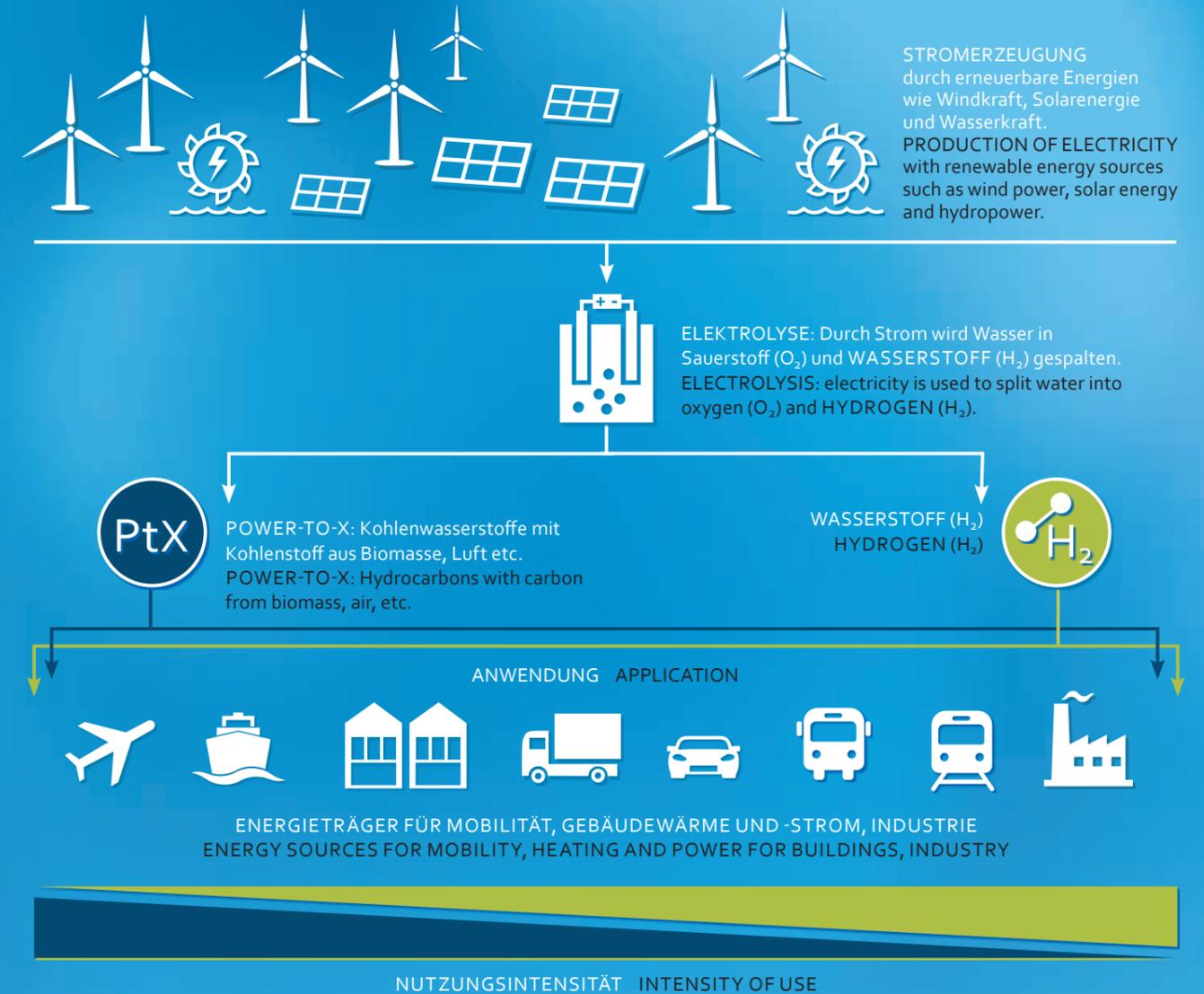
KONSEQUENZEN FÜR DIE INDUSTRIE

Im Fokus des Green Deals steht u. a. die Industrie. In diesem Sektor sollen tiefgreifende Transformationen erfolgen, vor allem in der energieintensiven Industrie. Eine Schlüsselrolle für deren Defossilisierung soll „grüner“ Wasserstoff spielen: H₂ soll die Chemieindustrie von fossilen Rohstoffen, insbesondere von Erdgas als Wasserstofflieferant, unabhängig machen und so u. a. der Düngemittelproduktion und der Petrochemie zur Klimaneutralität verhelfen. Der Stahlindustrie soll H₂ langfristig durch die Umstellung der Produktionsverfahren eine Treibhausgasreduzierung von 95% ermöglichen. Auch den Raffinerien kann H₂ bei der Transformation zur Klimaneutralität helfen: Im ersten Schritt können über den Ersatz von heute grauem, d. h. fossilem H₂ durch grünes H₂, die CO₂-Emissionen aus den Prozessen deutlich verringert werden. Im zweiten Schritt kann grünes H₂ als Basis für synthetisches Rohöl (sog. „Green Crude“) dienen.

The current "Global Risk Report 2020" provided the framework for discussions at the World Economic Forum in Davos in January 2020 where, for the first time, the climate crisis (Climate Action Failure) and its consequences for the global economy were set as a top priority of the next decade. The European Union took this as an opportunity to present the European Green Deal and to outline how Europe must be the first continent to become climate-neutral by 2050 at the latest. For the first time, hydrogen (H₂) is to become a key element of this process.

CONSEQUENCES FOR THE INDUSTRY

The Green Deal focusses on industry, among other things. In this sector, profound transformations are to take place, especially in energy-intensive industries. "Green" hydrogen is expected to play a key role in their defossilisation: H₂ can enable the chemical industry to become independent from fossil raw materials, especially from natural gas as a source of hydrogen, and thus help the fertiliser and petrochemical industries, among others, to achieve climate neutrality. In the long term, H₂ should allow the steel industry to achieve a 95% reduction in greenhouse gas emissions by adapting their production processes. H₂ can also help refineries to achieve climate neutrality: in a first step, the amount of CO₂ emitted from their processes can be significantly reduced by replacing today's grey, i.e. fossil H₂ with green H₂. In the second step, green H₂ can serve as the basis for synthetic crude oil (so-called green crude).



In allen angesprochenen Branchen zeichnen sich erste Aktivitäten zur Erprobung des Einsatzes von grünem Wasserstoff ab. So existieren deutschlandweit mehrere Pilotprojekte zur Stahlproduktion mit Wasserstoff und auch Raffinerien planen die ersten Schritte zum Einsatz von grünem Wasserstoff in ihren Produktionsprozessen (z. B. Hydrocracking, Hydrotreating).

AUSWIRKUNGEN AUF DEN MOBILITÄTSSEKTOR

Eine große Nachfrage nach grünem Wasserstoff – entweder direkt oder in Form synthetischer Kraftstoffe – entwickelt sich derzeit auch im Mobilitätssektor, denn nachhaltige Mobilität ist ein weiteres Schwerpunktthema des Europäischen Green Deals. In Kombination mit Brennstoffzellenantrieben soll Wasserstoff die Elektrifizierung des Verkehrs unterstützen, er ist aber vor allem entscheidend für diejenigen Bereiche der Mobilität, für die es aus heutiger Sicht auch langfristig keine Alternativen zu flüssigen, kohlenwasserstoffbasierten Kraftstoffen geben wird: für den Flugverkehr, die internationale Seeschifffahrt und Teile des Straßengüterverkehrs. Hier stellt grüner Wasserstoff als Basis für synthetisches Kerosin (E-Kerosin) und synthetischen Diesel (E-Diesel) die Zukunftsoption dar. Auch in diesem Kontext bilden sich aktuell Allianzen: Das zeigt eine Initiative der internationalen Reedereien für die Entwicklung strombasierter Kraftstoffe ebenso wie einige Pilotprojekte von Raffinerien in Kooperation mit Flughäfen mit dem Ziel der raschen Beimischung alternativer Kraftstoffe zur Senkung des CO₂-Ausstoßes im Flugverkehr.

Initial activities to test the application of green hydrogen are emerging in all aforementioned industries. Several pilot projects involving steel production with hydrogen are underway throughout Germany, and refineries are planning their first steps towards using green hydrogen in their production processes (e.g. hydrocracking and hydrotreating).

EFFECTS ON THE MOBILITY SECTOR

A considerable demand for green hydrogen – either directly or in the form of synthetic fuels – is currently also emerging in the mobility sector, as sustainable mobility is another key topic of the European Green Deal. In conjunction with fuel cell drives, the aim is for hydrogen to support the electrification of transport. On top of that, it is particularly important in those areas of mobility without any known long-term alternatives to liquid, hydrocarbon-based fuels: air traffic, international shipping and certain road transport sectors. The option for the future in these cases is to employ green hydrogen as the basis for synthetic kerosene (e-kerosene) and synthetic diesel (e-diesel) production. New alliances are currently emerging: for example international shipping companies started an initiative for the development of electricity-based fuels, and refineries carried out several pilot projects in cooperation with airports with the aim of rapidly blending alternative fuels to reduce CO₂ emissions in air traffic.



© Daimler AG

WASSERSTOFF WIRD WELTWEITES HANDELSGUT

Weltweit werden schon heute etwa 500 Mrd. m³ Wasserstoff (H₂) erzeugt, was energetisch betrachtet ca. 1,5 % des Weltenergiebedarfs entspricht. Damit ist H₂ ein wichtiger Rohstoff für die Industrie, allerdings wird er heute kaum im Energiesektor eingesetzt. Der überwiegende Teil des Bedarfs wird zudem vor Ort aus Erdgas erzeugt, sodass H₂ heute nahezu kein Handelsgut darstellt. Die EU strebt durch den Green Deal und die Wasserstoffstrategie eine Versiebenfachung der Wasserstoffnutzung in Europa bis 2050 gegenüber 2015 an, wobei die größten Zuwächse im Verkehr und in der Industrie, aber auch zur Wärme- und Kältebereitstellung für Gebäude sowie zur Stromversorgung (u. a. als Pufferspeicher) gesehen werden. Das soll helfen, 560 Mio. t CO₂ pro Jahr zu vermeiden, jährliche Umsätze von 820 Mrd. Euro zu generieren und 5,4 Mio. Arbeitsplätze zu schaffen (zum Vergleich: EU insgesamt 2017: 3,517 Mio. t CO₂). Mit der Einschätzung, welche Möglichkeiten sich mit Wasserstoff für eine klimaneutrale Zukunft bieten, steht Europa nicht allein: Es liegen Wasserstoffstrategien aus Japan, China, Korea, den USA und Australien vor, um nur einige zu nennen. In Abstimmung (Stand 4/2020) befindet sich auch die Strategie der Bundesregierung, die Maßnahmen für die Bereiche Erzeugung, Industrie, Infrastruktur, Verkehr, Wärme und Forschung umfasst.

Grünem Wasserstoff kommt eine Schlüsselrolle in einer klimaneutralen Wirtschaft zu: Er bzw. die daraus gewonnenen synthetischen Energieträger können ähnlich wie heute Rohöl und Erdgas weltweit gehandelt werden, wobei bestehende Handelsbeziehungen erhalten bleiben und neue Handelsströme und Handelspartner hinzu kommen können. Die globale Energiewirtschaft kann somit ohne Strukturbrüche durch Transformationsprozesse aus der bestehenden Wirtschaft heraus entwickelt werden. Der Druck, schnell Lösungen umzusetzen, die kurzfristig die Treibhausgasemissionen erheblich mindern, ist hoch und wächst stetig. Daher sollten bestehende Infrastrukturen so weit wie möglich umgewidmet und weitergenutzt werden, nicht zuletzt, um dadurch „stranded investments“ zu vermeiden.

HYDROGEN BECOMES A GLOBAL COMMODITY

About 500 billion m³ of hydrogen (H₂) is already being produced worldwide, equivalent to approx. 1.5% of the world's energy demand. H₂ is therefore an important industrial raw material, although it is hardly used in the energy sector. Moreover the greater part of the demand is met locally with natural gas, so that H₂ is not really considered to be a commodity today. With its Green Deal and hydrogen strategy, the EU aims to increase the use of hydrogen in Europe by a factor of seven by 2050 compared to 2015, with the greatest growth anticipated in transport and industry and in the provision of heating, cooling and electricity supply for buildings (including buffer storage tanks). This should help to save 560 million tonnes of CO₂ per year, generate annual sales of 820 billion euros and create 5.4 million jobs (cf: EU total 2017: 3,517 million tonnes of CO₂). Europe is not on its own when it comes to evaluating the opportunities that hydrogen offers for a climate-neutral future: Japan, China, Korea, the USA and Australia, to name but a few, all have hydrogen strategies. The German Federal Government's strategy, which includes measures for production, industry, infrastructure, transport, heat and research, is also currently in the approval process (as of 04/2020).

Green hydrogen has a key role to play in a climate-neutral economy: it, or the synthetic energy sources derived from it, can be traded worldwide in a similar way as crude oil and natural gas today, while maintaining existing trade relations and developing new trade flows and trading partners. The global energy industry could develop within the existing economy without any structural discontinuities caused by transformation processes. There is high and steadily rising pressure to quickly implement solutions that significantly reduce greenhouse gas emissions in the short term. For this reason, existing infrastructures ought to be repurposed and retained as far as possible, not least in order to avoid stranded investments.

// Focus



© Alstom/René Frampe

// CO₂-freier Zug „Coradia iLint“ mit wasserstoffbetriebener Brennstoffzelle.
// CO₂-free train "Coradia iLint" with hydrogen-powered fuel cell.

Was genau in welchem Umfang gehandelt und transportiert werden wird, ist bislang offen. Es könnte Wasserstoff sein, aber auch „Green Crude“ (ein aus erneuerbaren Energien stammendes Kohlenwasserstoffgemisch ähnlich dem heutigen Rohöl „Crude Oil“). Auch der Transport von Fertigprodukten wie E-Kerosin oder E-Diesel ist denkbar. Die neuen Handelsstrukturen sind anhand der Bedürfnisse der Handelspartner auszurichten, um auch Technologien aus der „alten“ fossilbasierten Welt einen Übergang in eine „neue“, auf erneuerbaren Energien basierende Welt zu ermöglichen (z. B. Raffinerien mit „Green Crude“). Deutschland wird aller Voraussicht nach auch zukünftig Importland für Energie bleiben und sollte den Ausbau der erneuerbaren Energien weiterhin vorantreiben. Zudem kann vom Transformationsprozess über den Export von innovativen Technologien wie Elektrolyseuren, Synthesereaktoren, Brennstoffzellen u. v. m. erheblich profitiert werden. Dies der deutschen und speziell der baden-württembergischen Industrie zu ermöglichen, ist Ziel des ZSW – als Ideen- und Impulsgeber ebenso wie als Technologieentwicklungspartner.

Which commodities exactly will be traded and transported, and to what extent, has not yet been decided. It could be hydrogen, or it could be green crude (a blend of hydrocarbons from renewable energy sources similar to today's crude oil). Even finished products might be transported, such as e-kerosene or e-diesel. The new trade structures must be aligned with the needs of trading partners in order to allow technologies from the "old" fossil-based world to make the transition into a "new" world based on renewable energy sources (e.g. refineries with green crude). In all likelihood, Germany will still be an energy importing country in the future and should continue to advance the expansion of renewable energy sources. The transformation process can also yield considerable benefits through the export of innovative technologies such as electrolyzers, synthesis reactors and fuel cells. A source of ideas and impulses and a partner in technology development, ZSW aims to enable this transformation for the German industry and that of Baden-Württemberg in particular.

GRÜNER WASSERSTOFF – VON DER ERZEUGUNG BIS ZUR NUTZUNG

GREEN HYDROGEN – FROM PRODUCTION TO UTILISATION

Für eine neutrale CO₂-Bilanz von Wasserstoffanwendungen ist eine nachhaltige Wasserstoffproduktion entscheidend. Daher ist es besonders wichtig, die Herkunft des Wasserstoffs klar zu benennen. Wasserstoff wird bislang vor allem als grau, blau und grün bezeichnet. 90 % des Wasserstoffs heute wird aus fossilen Energieträgern, meistens aus Erdgas, hergestellt und verkauft. Hierbei handelt es sich um grauen oder auch blauen Wasserstoff, da bei seiner Produktion CO₂-Emissionen entstehen. Von blauem Wasserstoff spricht man, wenn die CO₂-Emissionen im Produktionsprozess abgeschieden und in unterirdischen Lagerstätten eingelagert werden.

Eine umfassend und nachhaltig klimaschützende Eigenschaft hat aber nur „grüner“ Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Quellen durch Elektrolyse gewonnen wird. Neben der Forschung und Entwicklung zu erneuerbaren Energien und Batteriespeichern am ZSW bilden die Themen Elektrolyse, Power-to-X und Brennstoffzellen den dritten technologischen Schwerpunkt. Die Arbeiten in diesem Bereich werden im Folgenden anhand beispielhafter Projekte veranschaulicht.

Sustainable hydrogen production is essential when it comes to achieving CO₂-neutral hydrogen applications. So it is of particular importance to clearly identify the hydrogen's origin. To date, hydrogen has mainly been labelled grey, blue and green. 90% of hydrogen sold today is produced using fossil energy sources, mostly natural gas. This is called grey or sometimes blue hydrogen because its production leads to CO₂ emissions. One refers to hydrogen as blue hydrogen when the CO₂ emissions are captured during the production process and then stored in underground reservoirs.

Only "green" hydrogen, however, which is produced with electricity from renewable energy sources by way of electrolysis, offers comprehensive and sustainable climate protection. Alongside research and development on renewable energy and battery storage, ZSW bundles the topics of electrolysis, Power-to-X and fuel cells as a third major area of technological focus. In the following, activities in this area will be presented by means of example projects.

ELEKTROLYTISCHE WASSERSTOFFERZEUGUNG AUS WASSER: DER ERSTE SCHRITT FÜR ALLE POWER-TO-X-VERFAHREN

Die Wasserelektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff wird im Rahmen der Energiewende bzw. zur Erreichung der Klimaziele als Bindeglied zwischen erneuerbarem Strom, anderen Energieträgern und Grundstoffen benötigt. Alleine für Deutschland wird bis zum Jahr 2050 ein erheblicher Ausbau an installierter Elektrolysekapazität im zweistelligen Gigawattbereich erwartet. Bei der Wasserelektrolyse wird über zwei Elektroden, Kathode und Anode, Wasser mittels elektrischer Energie in seine zwei gasförmigen Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die beiden Gase werden separat aufgefangen und gereinigt. Aus dieser elektrochemischen Wasserspaltung wird nur der Wasserstoff gespeichert und ggf. transportiert, da bei der Energierückgewinnung an einem beliebigen Ort der Wasserstoff mit Luft-Sauerstoff wieder zu Wasser rekombiniert werden kann. Wasserstoff (H₂) ist gasförmig und beliebig lange speicherbar. Da H₂ sowohl als chemischer Rohstoff in vielen Prozessen weltweit genutzt wird wie auch als Energie-zwischenspeicher oder Energieträger, besteht eine jahrzehntelange Erfahrung im sicheren Umgang und der Nutzung von H₂.

Die drei grundlegenden Elektrolyseprinzipien sind die alkalische Elektrolyse (AEL), die wässrige Kalilauge als stromleitendes Medium nutzt, die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM), die eine ionisch leitende Membranfolie zwischen den Elektroden-schichten nutzt, sowie die Hochtemperaturelektrolyse (SOE), die eine bei hoher Temperatur leitfähige Keramikfolie zwischen den Elektroden nutzt.

ELECTROLYTIC HYDROGEN PRODUCTION FROM WATER: THE FIRST STEP OF ALL POWER-TO-X PROCESSES

As it links renewable electricity with other energy sources and raw materials, water electrolysis for the production of hydrogen is essential in the context of the energy transition and achieving climate goals. By 2050, a considerable expansion in installed electrolysis capacity in the double-digit gigawatt range is expected for Germany alone. In water electrolysis, water is split into its two constituent elements, hydrogen and oxygen, by passing electricity through two electrodes, the cathode and the anode. The two gases produced are collected and cleaned separately. Only the hydrogen produced in this electrochemical water splitting process is stored and, if necessary, transported, since hydrogen can be recombined with oxygen from the air to form water at any desired location during energy recovery. Hydrogen is gaseous and can be stored for any desired length of time. Given that H₂ is used both as a chemical raw material in many processes worldwide and as an energy buffer and energy source, a wealth of experience in the safe handling and use of H₂ has been accumulating for decades.

The three fundamental electrolysis principles are alkaline electrolysis (AEL), which uses an aqueous potassium hydroxide solution as an electrically conductive medium, polymer electrolyte membrane electrolysis (PEM), which uses an ionically conductive membrane foil between the electrode layers, and high-temperature electrolysis (SOE), which uses a ceramic film that is conductive at high temperatures between the electrodes.

ELEKTRODEN-, ELEKTROLYSEBLOCK- UND ANLAGENENTWICKLUNG

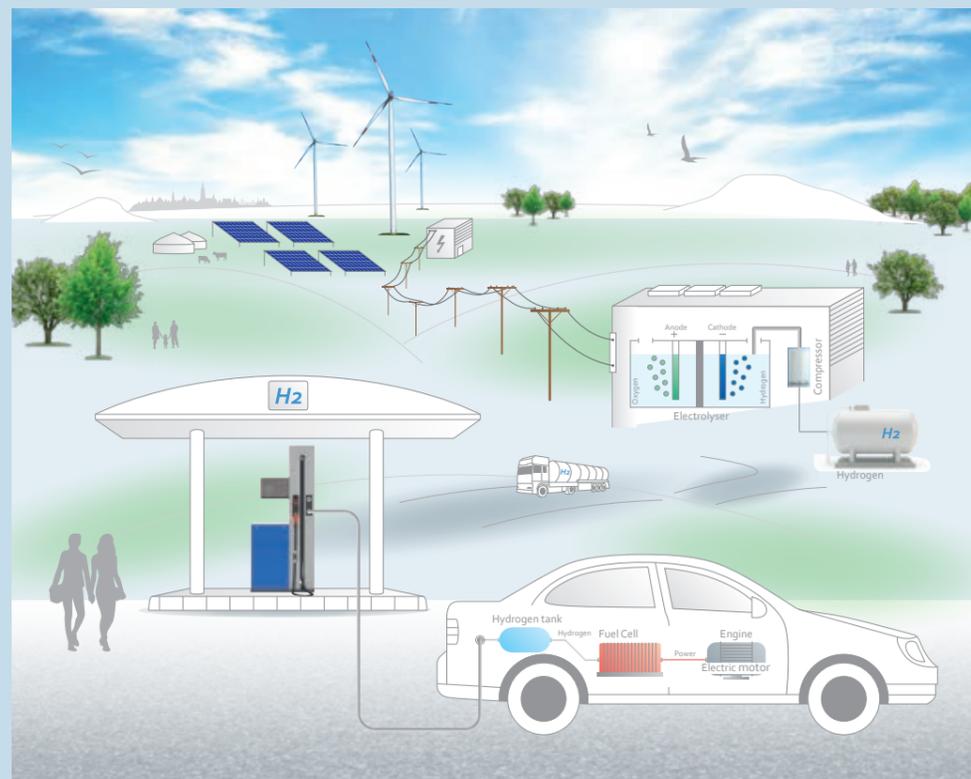
Das ZSW erforscht und entwickelt intensiv die Technologie der alkalischen Elektrolyse (AEL): von der Elektroden-, Elektrolyseblock- und Anlagenentwicklung bis zum Bau und Betrieb von Forschungs- und Demonstrationsanlagen. Die AEL wird bereits seit Jahrzehnten in Nischenanwendungen kommerziell eingesetzt. Im Rahmen mehrerer Pilotprojekte wurde in den vergangenen Jahren die Eignung für Power-to-X-Anwendungen erfolgreich nachgewiesen. Die Kosten der AEL liegen bei einer elektrischen Leistung von wenigen Megawatt bei etwa 1.000-1.500 Euro pro Kilowatt. Für einen wirtschaftlichen Betrieb in Power-to-X-Anwendungen müssen die Kosten jedoch auf wenige hundert Euro pro kW sinken. Der AEL wird neben einer guten Skalierbarkeit in große Leistungsklassen auch ein hohes Kostensenkungspotenzial attestiert. Das ZSW arbeitet insbesondere an Materialien, Methoden (z. B. Elektrodenbeschichtungen) oder verfahrenstechnischen Konzepten (z. B. Konstruktion des Elektrolyseblocks), die diese Skalierung in den Multi-MW-Maßstab unterstützen und eine Serienfertigung zulassen. Der Leistungsbereich beginnt bei wenigen Kilowatt für Forschungs- und Testsysteme zur Vorvalidierung von Materialien und Bauteilen und reicht bis in den unteren Megawatt-Maßstab für Demonstrationsanlagen. Je nach Anwendungszweck oder Kostenvorgaben werden sowohl drucklose Systeme als auch Druckelektrolyseure entwickelt und gebaut.

Die Wissenschaftler und Ingenieure konzipieren darüber hinaus Wasserstoffherstellungsanlagen inklusive aller Nebenaggregate – vom elektrischen Anschluss bis zur Abgabe von Wasserstoff an

ELECTRODE, ELECTROLYSIS BLOCK AND SYSTEM DEVELOPMENT

Research and development of alkaline electrolysis (AEL) at ZSW is extensive: it ranges from the development of electrodes, electrolysis blocks and plants to the construction and operation of research and demonstration plants. AEL has been used in niche commercial applications for several decades. Its for Power-to-X applications has been successfully demonstrated in several pilot projects in recent years. The costs of AEL are around 1,000 - 1,500 €/kW for an electrical output of a few MW. For cost-effective operation in Power-to-X applications, the costs must be reduced to a few hundred euros per kW. In addition to good scalability to high performance ranges, AEL is expected to have high potential for cost reduction. ZSW is working on materials, methods (e.g. electrode coatings) and process engineering concepts (e.g. construction of the electrolysis block) that support this multi-MW scaling and allow for series production suitability. The power range starts at a few kilowatts for research and test systems, used to pre-validate materials and components, and extends to the lower megawatt scale for demonstration systems. Depending on application and cost specifications, both unpressurised systems and pressurised electrolyzers are being developed and built.

The scientists and engineers also design hydrogen production systems including all ancillary units – from the electrical connection to the delivery of hydrogen to users – on the basis of AEL and PEM electrolyzers and develop concepts for installation, safety



// H₂ von der Erzeugung per Elektrolyse in den Tank.
// H₂ from production by electrolysis to storage in a tank.



// Betriebsfertiger 20-zelliger Elektrolyse-Versuchsblock mit ca. 105 kW.
// 20-cell electrolysis test block with approx. 105 kW ready for operation.

Nutzer – auf der Basis von AEL- und PEM-Elektrolyseuren sowie Aufstellungs-, Sicherheits- und Betriebskonzepte und unterstützen auf diese Weise ihre Partner bei der Realisierung ihrer eigenen Projekte.

Neben der Entwicklung und dem Bau von Komponenten und Anlagen spielt die Qualitätssicherung eine große Rolle. Mit hausinternen AEL-Testanlagen kann das ZSW auch Fremdentwicklungen von Elektroden, elektrochemischen Beschichtungen, Elektrolyseblöcken und anderen Systemkomponenten testen und vermessen. Dazu sind alkalische drucklose und Druck-Elektrolysetestsysteme im Leistungsbereich 1, 10 und 100 kW_{el} sowohl im atmosphärischen als auch im Druckbetrieb bis 40 bar vorhanden. Zusätzlich werden zugekaufte und selbst gebaute Demonstrationsanlagen mit 0,3 bzw. 0,5 MW_{el} betrieben.

POWER-TO-GAS MADE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

In einem vom Wirtschaftsministerium geförderten Leuchtturmprojekt „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ untersuchen Wissenschaftler, wie Wasserstoff effizient und kostengünstig produziert werden kann. Dadurch sollen technologische Potenziale identifiziert sowie innovative Komponenten und Verfahren praxisnah erprobt werden. Am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein wurde hierfür ein kommerzieller 1-MW-Elektrolyseur errichtet. Ein eigenes etabliertes Monitoringsystem vermisst diesen industriellen Anlagenteil. Darauf aufbauend erstellen die ZSW-Forscher einen Technologieleitfaden, der Verbesserungspotenziale aufzeigt. In der am Standort angeschlossenen Forschungsplattform testet das ZSW parallel in der Reallaborumgebung einen eigenen Elektrolyseur mit neuen Komponenten. Zum Einsatz kommen etwa günstigere und leistungsfähigere Elektroden von Forschungspartnern. Erste Testergebnisse bestätigen eine 20% höhere Leistungsdichte verglichen mit dem kommerziellen Anlagenteil.

and operation, thus supporting their partners in the implementation of their own projects.

Quality assurance plays a major role alongside the development and construction of components and plants. ZSW can also test and measure third-party developments of electrodes, electrochemical coatings, electrolysis blocks and other system components with in-house AEL test facilities. For this purpose, ZSW uses pressureless alkaline and pressurised electrolysis test systems in the power ranges of 1, 10 and 100 kW_{el}, both for atmospheric and for pressurised operation at up to 40 bar. In addition, purchased and self-built demonstration plants with 0.3 and 0.5 MW_{el} are used.

POWER-TO-GAS MADE IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Scientists are investigating how hydrogen can be produced efficiently and cost-effectively in a flagship project called Power-to-Gas Baden-Württemberg, funded by the State Ministry of Baden-Württemberg for Economic Affairs, Labour and Housing Construction. The aim is to identify technological potential and to test innovative components and processes under realistic conditions. For this purpose, a commercial 1-MW electrolyser was installed at the Wyhlen hydroelectric power plant on the Upper Rhine. A specially developed monitoring system is used to survey this industrial part of the plant. Based on the results, ZSW researchers are compiling a technology guideline that lists opportunities for further improvement. With the research platform connected to the site, ZSW is able to test its own electrolyser with new components in parallel in a real-world laboratory environment. More cost-effective and higher-power electrodes from research partners are used here. First test results confirm a 20% higher power density when compared to the commercial part of the plant.

Nicht nur die Elektrolyse, sondern auch die damit verbundenen Komponenten und Subsysteme werden hinsichtlich Kosten- und Effizienzpotenzialen mit dem Ziel analysiert, erfolgversprechende Ideen in P2G®-Produkte umzusetzen. Diese Arbeiten sollen dazu beitragen, dass die Erzeugung grüner Kraftstoffe mittels P2G®-Technologie zukünftig im In- und Ausland gewinnbringend verwertet werden kann, und gleichzeitig einen Beitrag für eine CO₂-neutrale Mobilität leisten. So wird der in Wyhlen erzeugte Wasserstoff vor Ort in Trailer gefüllt und kann beispielsweise Tankstellen mit regenerativem Wasserstoff versorgen. Der Standort bietet zudem die Möglichkeit, die Abwärme aus der Elektrolyse und den Nebenaggregaten künftig in einem nahegelegenen Wohngebiet zu nutzen; so lässt sich der Gesamtstromnutzungsgrad der Elektrolyseanlage auf über 90% steigern.

WYHLEN GEWINNT BEIM IDEENWETTBEWERB „REALLABORE DER ENERGIEWENDE“

Der Power-to-Gas-Standort in Wyhlen ist einer der Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ des Bundeswirtschaftsministeriums. Bei einer Bewilligung des Vorhabens ist geplant, in einem Verbund mit Partnern aus Industrie und Forschung die Stadt Grenzach-Wyhlen zu einem Reallabor für Wasserstoff auszubauen. Das beinhaltet, dass die Anlage aus dem Leuchtturmprojekt (s. S. 22) leistungsseitig erweitert wird und der regenerative Wasserstoff in den Sektoren Industrie und Mobilität sowie die Abwärme der Prozesse zur Hausenergieversorgung wirtschaftlich genutzt werden. Das ZSW will in dem Projekt neben dem Technologiemonitoring und einer systemanalytischen Begleitforschung insbesondere an der Industrialisierung der alkalischen Elektrolyse weiterarbeiten. Das beinhaltet die Untersuchung von Materialien und Methoden, die eine Serienfertigung und Skalierung der Technologie erlauben, sowie die Erprobung von Funktionsmustern und Prototypen in der bestehenden Forschungsplattform in Reallaborumgebung.

With the aim of converting promising ideas into P2G® products, not only electrolysis itself but also the associated components and subsystems are being analysed in terms of their cost and efficiency potentials. This work is intended to help ensure that the production of green fuels using P2G® technology can be profitably harnessed in Germany and elsewhere in the future – and at the same time make a contribution to CO₂-neutral mobility. For example, hydrogen produced in Wyhlen is filled into trailers on-site to supply filling stations with regenerative hydrogen. The location also offers the future option of using waste heat produced from electrolysis and auxiliary equipment in a neighbouring residential area; this would allow the overall degree of power utilisation of the electrolyser to rise further, in excess of 90%.

WYHLEN WINS THE IDEA COMPETITION “REAL-WORLD LABORATORIES OF THE ENERGY TRANSITION”

The Power-to-Gas site in Wyhlen is one of the winners of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy’s idea competition “Real-world laboratories of the energy transition”. If the project is approved, the town of Grenzach-Wyhlen will be developed into a real-world hydrogen laboratory in a network with partners from industry and research. This entails extending the power output of the plant from the flagship project (see p. 22) and utilising regenerative hydrogen cost-effectively in the industry and mobility sectors, as well as waste heat for domestic energy supply. ZSW intends to continue working on the industrialisation of alkaline electrolysis during the project, in addition to technology monitoring and accompanying systems analytical research. This includes researching materials and methods that would allow for volume production and scaling and testing functional models and prototypes in the existing research platform in the real-world laboratory environment.



// ZSW-Forschungsplattform mit eigenem Elektrolyseur und neuartigen Komponenten am Wasserkraftwerk Wyhlen.
// ZSW research platform with its own electrolyser and novel components at the Wyhlen hydroelectric power plant.



// Erzeugung von grünem H₂ am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein – kommerzieller 1-MW-Elektrolyseur mit angebundener ZSW-Forschungsplattform.
// Generation of green H₂ at Wyhlen hydroelectric power plant on the Upper Rhine – commercial 1-MW electrolyser with connected ZSW research platform.

MOBILITÄT MIT GRÜNEM (KOHLEN-)WASSERSTOFF

MOBILITY WITH GREEN HYDROCARBON

MOBILITÄT MIT WASSERSTOFF UND BRENNSTOFFZELLE

Mit grünem Wasserstoff (H₂) betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs) sind eine der umwelt- und klimafreundlichsten Lösungen im Verkehr, vor allem auf langen Strecken. Die Brennstoffzelle hat heute schon einen etwa doppelt so hohen Wirkungsgrad wie ein Verbrennungsmotor; er liegt je nach Betrieb bei bis zu 65%. Die Technologie ist reif für den Markt und erste zehntausend Brennstoffzellenfahrzeuge werden weltweit erprobt. FCEVs werden über einen Elektromotor angetrieben, die Technik unterscheidet sich aber deutlich vom Batteriefahrzeug (Battery Electric Vehicles, BEVs), denn der Strom wird direkt an Bord aus H₂ und Luft erzeugt. Die als Nebenprodukt erzeugte Wärme kann zur Beheizung des Innenraums genutzt werden. Eine Batterie unterstützt das Brennstoffzellensystem während der Beschleunigung und beim regenerativen Bremsen. Der Vorteil von FCEVs gegenüber BEVs liegt vor allem in der schnellen Betankung und großen Reichweite (ca. 3 Minuten für 500 km) sowie dem geringeren Gewicht. Sie eignen sich neben dem Antrieb von Reiselimousinen insbesondere für Busse, den Schwerlastverkehr sowie für Züge und Schiffe. Langfristig können mit grünem Wasserstoff betriebene FCEVs wichtige Einsatzbereiche der Dieselmotoren übernehmen.

Bis Januar 2020 stieg die Zahl wasserstoffbetriebener Brennstoffzellenfahrzeuge weltweit von 11.200 Ende 2018 auf rund 19.000 Einheiten. Kommerzielle, serienreife Modelle (Pkw und Lkw), bieten in Deutschland derzeit zwei asiatische Hersteller an: Toyota seit 2014 und Hyundai seit 2013. Mercedes Benz fährt seit 2018 den GLC F-CELL als Versuchsflotte. Weitere Hersteller haben erste Flotten für Mitte der 2020er Jahre angekündigt: IVECO will den Elektro- und Brennstoffzellen-Lkw Nikola TRE ab 2021 im Ulmer Werk produzieren und bis 2023 erste Modelle ausliefern. In der Schweiz sollen 1.600 Schwerlast-Lkws von Hyundai Hydrogen Mobility (HHM) bis 2025 unterwegs sein. Darüber hinaus sind an mehreren Orten Busse sowie erste Nahverkehrszüge im Linienverkehr mit Wasserstoff unterwegs. Nach den internationalen

MOBILITY WITH HYDROGEN AND FUEL CELLS

Fuel cell electric vehicles (FCEVs) powered by green hydrogen (H₂) are one of the most environmentally and climate-friendly solutions for transport, especially over long distances. A fuel cell already has about twice the efficiency of a combustion engine. Depending on the mode of operation, efficiency is up to 65%. The technology is ready for the market, and the first ten thousand fuel cell vehicles are being tested worldwide. While FCEVs are powered by an electric motor, their technology differs significantly from battery electric vehicles (BEVs) because the electricity is generated directly on board using H₂ and air. The heat generated as a by-product can be used to heat the interior. A battery supports the fuel cell system during acceleration and regenerative braking. The main advantages of FCEVs over BEVs are fast refuelling and their long range (approx. 3 minutes for 500 km) as well as their lower weight. In addition to powering long-distance limousines, they are particularly suitable for buses, heavy-load vehicle transport, trains and ships. In the long term, FCEVs powered by green hydrogen could be used to replace diesel engines in their typical areas of application.

The number of hydrogen-powered fuel cell vehicles worldwide has increased from 11,200 at the end of 2018 to around 19,000 units in January 2020. Commercial, series-ready models, cars and lorries are currently available in Germany through two Asian manufacturers (Toyota, since 2014, and Hyundai, since 2013). Mercedes Benz has been using the GLC F-CELL as a test fleet since 2018. Other manufacturers have announced first fleets for the mid-2020s: IVECO is planning to produce the Nikola TRE battery- and fuel cell powered lorry at its Ulm plant starting in 2021 and intends to have the first models available by 2023. In Switzerland, 1,600 heavy-duty lorries from Hyundai Hydrogen Mobility (HHM) will be on the road by 2025. In addition, buses and the first scheduled hydrogen-powered local trains are already in operation in several locations. According to international roadmaps, more than one million fuel cell vehicles are planned for China by 2030,

Roadmaps sind für China bis zum Jahr 2030 über eine Million Brennstoffzellenfahrzeuge geplant und Korea stellt 700.000 Brennstoffzellenfahrzeuge für 2025 in Aussicht. In Japan sollen bis 2030 ca. 800.000 Brennstoffzellenautos unterwegs sein.

and Korea has announced 700,000 fuel cell vehicles for 2025. In Japan, about 800,000 fuel cell cars are planned to be on the road by 2030.

PRODUKTIONSFORSCHUNG ZU BRENNSTOFFZELLEN

Das Wertschöpfungspotenzial bei Brennstoffzellen ist groß. Um es zu erschließen, muss es aber gelingen, die Kosten zu senken und nennenswerte Stückzahlen anzubieten. Das Projekt „HyFaB – Forschungsfabrik für Brennstoffzellen“ dient deshalb dazu, von der aktuell handwerklichen Produktion zur industriellen Massenproduktion zu kommen. Hochleistungsbrennstoffzellenstacks (engl. stack = „Stapel“) sind komplexe Konstruktionen: hunderte von Einzelzellen, bestehend aus Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) mit 10 Mikrometer dünnen Membranen, müssen mit Bipolarplatten mit knapp 1 Millimeter Bauhöhe und filigranen Gasverteilerstrukturen plus den Gasdiffusionslagen aus porösem Kohlefaserwolle aufeinander abgestimmt und zu einem Stapel zusammengefügt werden. Die notwendige automatisierte Fertigungstechnologie für die in Großserienautomobilen typischen Stückzahlen ist weltweit noch in einem frühen Stadium.

In HyFaB will das ZSW in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und weiteren Akteuren aus Industrie und Forschung automatisierte Prozesse zur Fertigung und Qualitätssicherung für Brennstoffzellen entwickeln und erproben. Exemplarische Themen am ZSW in Ulm sind die Assemblierung und Qualitätssicherung von MEAs sowie vollautomatische Füge-techniken und Herstellprozesse für Zellen. Weitere Arbeiten erfolgen zu Fabrikabnahmetests und großserientauglichen Inbetriebnahme-prozeduren für Brennstoffzellenstacks. Für HyFaB soll die Forschungsinfrastruktur am ZSW in Ulm deutlich ausgebaut werden.

PRODUCTION RESEARCH ON FUEL CELLS

The value-added potential of fuel cells is great. In order to exploit it, however, it is vital to lower costs and produce significant quantities. The project “HyFaB – Research Factory for Fuel Cells” therefore seeks to make the transition from current manual production to industrial mass production. High-performance fuel cell stacks are complex systems: hundreds of individual cells, consisting of membrane electrode units with 10-micrometre-thin membranes, have to be aligned with bipolar plates with an overall height of almost 1 millimetre and filigree gas distribution structures plus the gas diffusion layers consisting of porous carbon fibre fleece and then joined together to form a stack. The required automated production technology for the quantities typical in mass-produced automobiles is still at an early stage worldwide.

In HyFaB, ZSW will develop and test automated manufacturing and quality assurance processes for fuel cells in cooperation with the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE and stakeholders in industry and research. Typical activities at ZSW in Ulm include the assembly and quality assurance of membrane electrode assemblies (MEAs) as well as fully automated joining methods and manufacturing processes for cells. Further work is being carried out on factory acceptance tests and commissioning procedures for fuel cell stacks suitable for large-scale production. The research infrastructure at ZSW in Ulm will be significantly upgraded for HyFaB.



©FVV/Dirk Lässig



// Brennstoffzellenforschung: Bau eines Stacks im Fahrzeugdesign (links) sowie CAD-Brennstoffzellenstack im Forschungsdesign (oben).
// Fuel cell research: assembly of a stack in vehicle design (left) and a CAD fuel cell stack in research design (top).



©FVV/Dirk Lässig

// Das ZSW erforscht vollautomatische Füge-techniken und Herstellprozesse für Brennstoffzellen.
// ZSW researches fully automated joining methods and manufacturing processes for fuel cells.

LEBENSDAUER VON BRENNSTOFFZELLEN

Mit der weltweit laufenden Markteinführung von Brennstoffzellen für mobile und stationäre Anwendungen steigt die Nachfrage nach unabhängigen Testeinrichtungen. Am ZSW zeigt sich dieser Trend beispielsweise anhand der Brennstoffzellen-Teststunden, die im Jahr 2019 mit 80.000 Stunden und einem H₂-Verbrauch von 21 Tonnen ein Rekordniveau erreicht haben. Die Anwendung im Straßenverkehr unter den im Fahrzyklus auftretenden hochdynamischen Belastungszuständen stellt hohe Anforderungen an die Robustheit der Brennstoffzellenstacks. Am ZSW werden hierzu entsprechende Dauerversuche gefahren. Das Prüffeld ist aktuell ausgestattet mit 25 vollautomatischen Testständen im Rund-um-die-Uhr-Betrieb, die kontinuierlich aktualisiert und ausgebaut werden. Mit einem in über 25 Jahren aufgebauten Know-how zu Brennstoffzellentests und -systemtechnik ist das ZSW Partner bei der Entwicklung zukünftiger Produkte. Durch den Betrieb unterschiedlicher Stacks werden technologische Trends nachweisbar, beispielsweise in Bezug auf die zunehmende Leistungsdichte und Robustheit der Brennstoffzellen. Industriepartner nutzen diese Expertise, um Produkte weiterzuentwickeln, zu qualifizieren sowie deren Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit durch das ZSW nachzuweisen. In öffentlich geförderten Projekten werden darüber hinaus wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

QUALITÄTSCHECK: WASSERSTOFF ALS KRAFTSTOFF

Parallel zur Markteinführung von Brennstoffzellen-Serienfahrzeugen erfolgt weltweit der Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur und -tankstellen, auch Hydrogen Refueling Stations (HRS) genannt. Bis 2025 sollen die Ende 2019 weltweit rund 260 HRS auf 3.500 H₂-Stationen gesteigert werden, 600 davon in den USA und 830 in Asien. Die Zahl in Europa soll von 118 auf 2.000 steigen. Deutschland plant – in Abhängigkeit vom bis dahin stattfindenden Fahrzeughochlauf –, die aktuell rund 80 Stationen bis 2023 auf 400 zu erweitern. Der Betankungsvorgang für Wasserstoff ist in

FUEL CELL SERVICE LIFE

With the currently ongoing global market entry of fuel cells for mobile and stationary applications, the demand for independent test facilities is on the rise. This trend is apparent at ZSW, for example in the fuel cell test times. A record level was reached in 2019 with 80,000 test hours and an H₂ consumption of 21 tonnes. Given the highly dynamic load conditions occurring during the driving cycles, road traffic applications place high demands on the robustness of the fuel cell stacks. For this reason, corresponding long-term tests are being carried out at ZSW. The test facility is currently fitted with 25 fully automatic test rigs in round-the-clock operation, which are continuously being updated and expanded. With more than 25 years of experience in fuel cell testing and system technology, ZSW is a partner in the development of future products. Technological trends can be identified by running different stacks, for example with regard to the increasing power density and robustness of fuel cells. Industrial partners make use of this expertise in order to further develop and qualify products and to have their operational safety and reliability proven by ZSW. In addition, publicly funded projects lead to valuable data and experience made available to the general public.

QUALITY CHECK: HYDROGEN AS A FUEL

Hydrogen infrastructure and filling stations, also known as Hydrogen Refueling Stations (HRS), are being built worldwide in parallel with the market launch of series-produced fuel cell powered vehicles. By 2025, the number of HRS is to increase to 3,500 H₂ stations from the 260 existing worldwide at the end of 2019. 600 of them will be in the United States and 830 in Asia. The number in Europe is expected to rise from 118 to 2,000. Depending on the vehicle ramp-up that occurs until then, Germany plans to expand the current 80 or so stations to 400 by 2023. The refuelling process for hydrogen is regulated in globally applicable standards and is thus carried out according to precisely regulated processes. 700 bar hydrogen pressure is the standard refuelling

weltweit gültigen Normen geregelt und erfolgt nach genau geregelten Abläufen. Betankungsstandard sind 700 bar Wasserstoffdruck. Die exakte Bestimmung der abgegebenen Mengen des Gases erfordert im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen aber ganz neue Methoden und Messgeräte. Die Einhaltung der Betankungsnorm an den Tankstellen muss deshalb vor der Erstinbetriebnahme abgenommen und danach regelmäßig überprüft werden. Außerdem können bei der Wasserstoffherstellung, dem Transport zur Tankstelle, beim Verdichten des Gases oder während der Betankung schädliche Verunreinigungen eingeschleppt werden.

Das ZSW ist in mehrere Projekte zum Aufbau einer europäischen Wasserstoffinfrastruktur eingebunden. Die Expertise liegt bei der Überprüfung der international gültigen Normen zum Betankungsvorgang (SAE J2601) und zur Wasserstoffqualität (ISO 14687-2, EN 17124). Zur Abnahme von Wasserstofftankstellen haben die Wissenschaftler ein mobiles Abnahmesystem entwickelt, mit dem bis Januar 2020 insgesamt 20 Abnahmen in Deutschland durchgeführt wurden. Weiterhin wurden Wasserstoffprobenahmen zur Qualitätsüberprüfung in Deutschland, Österreich und der Schweiz durchgeführt und im Ulmer Labor für Wasserstoffqualität – einem von bundesweit zwei unabhängigen Laboren zur Wasserstoffanalytik – analysiert. Dieses Labor wurde im Projekt HyLaB am ZSW realisiert und ist seit Dezember 2018 einsatzfähig.

KOSTENBETRACHTUNGEN ZU WASSERSTOFF

Die Diskussion bezüglich Betankungsinfrastruktur, Kosten und Reichweite von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenfahrzeugen ist vergleichbar mit der über batteriebetriebene E-Autos. In beiden Fällen muss eine öffentlich zugängliche Infrastruktur aufgebaut werden. Doch in den kommenden Jahren wird sich hier einiges tun. Die Wirkungsgradverluste bei der Herstellung und dem Transport von Wasserstoff werden abnehmen, wodurch gleichzeitig die Kraftstoffkosten sinken. Verschiedene aktuelle Studien stellen für den Zeitraum bis 2030 eine Kostensenkung für viele

pressure. However, in order to determine the exact amount of gas delivered, entirely new methods and measuring devices are required. For this reason, refuelling stations must be inspected for compliance with the refuelling standard before initial commissioning, with regular follow-ups thereafter. In addition, harmful contaminants can be introduced during hydrogen production, transport to the filling station, compression of the gas or during the refuelling process itself.

ZSW is involved in several projects aimed at establishing a European hydrogen infrastructure. Its expertise lies in the review of the internationally valid standards on refuelling (SAE J2601) and hydrogen quality (ISO 14687-2, EN 17124). ZSW researchers have developed a mobile inspection system for HRS, with which a total of 20 inspections were carried out in Germany up to January 2020. They also sampled hydrogen for quality control purposes in Germany, Austria and Switzerland and analysed the extracted quantities in the Ulm Laboratory for Hydrogen Quality – one of two independent laboratories for hydrogen analysis in Germany. This laboratory was set up as part of the HyLaB project at ZSW and has been fully operational since December 2018.

COST CONSIDERATIONS FOR HYDROGEN

The discussion concerning the refuelling infrastructure, costs and range of hydrogen-powered fuel cell vehicles is comparable to that of battery-powered electric cars. In both cases, a publicly accessible infrastructure has to be built. However, there will be a flurry of activity in the coming years. Efficiency losses in the production and transport of hydrogen will decrease and lead to a reduction of fuel costs. Various recent studies predict cost reductions of up to 50% for many applications in the period leading up to 2030. The steam reforming method for natural gas is still the cheapest option for hydrogen production available today. However, hydrogen produced this way is not regenerative, unlike when renewable electricity is used in electrolysis. The cost



// Blick ins Brennstoffzellentestzentrum. Aktuell fahren 25 vollautomatische Teststände im Rund-um-die-Uhr-Betrieb.
// A look inside the fuel cell test centre. At present, 25 fully automatic test rigs are running in round-the-clock operation.



// ZSW-System zur Abnahme von H₂-Tankstellen nach SAE J2601.
// ZSW system for the approval of H₂ refuelling stations in compliance with SAE J2601.

Anwendungen um bis zu 50 % in Aussicht. Die Dampfreformierung von Erdgas stellt die heute noch preiswerteste Option zur Wasserstoffherstellung dar. Der so hergestellte Wasserstoff ist jedoch, anders als beim Einsatz von erneuerbarem Strom in der Elektrolyse, nicht regenerativ. Die Kosten der Wasserstoffherstellung durch Wasserelektrolyse von regenerativer Energie hängt stark von den Strom- und den Kapitalkosten der Elektrolyseanlagen ab. Unter idealen Bedingungen, wie z. B. im PtG-Projekt am Wasserkraftwerk Wyhlen, wo ein günstiger Strombezug und hohe jährliche Laufzeiten gegeben sind, werden bereits heute annähernd konkurrenzfähige Erzeugungskosten erreicht.

Um die Wasserelektrolyse und Brennstoffzellen grundsätzlich wettbewerbsfähiger zu machen, sind weitere Forschungen an alternativen Materialien für Katalysatoren und Membranen, aber auch an verfahrenstechnischen Fragen erforderlich. Weitere Kosteneinsparungen sind möglich durch den Einsatz von skalierbaren und serientauglichen Materialien sowie Fertigungsverfahren, wie sie beispielsweise im HyFaB-Projekt oder im Rahmen des Reallabors H₂-Wyhlen auf den Weg gebracht werden sollen.

PRODUKTION VON E-FUELS MIT CO₂ AUS DER LUFT

Für die erneuerbare Energieversorgung werden auch zukünftig Kohlenwasserstoffe benötigt, insbesondere in den Bereichen, die nicht vollständig elektrifizierbar sind oder in denen Wasserstoff nicht direkt genutzt werden kann. Das betrifft z. B. Kraftstoffe für den Flug-, Schiffs-, Bahn- und Schwerlastverkehr, saisonale Energiespeicher und chemische Rohstoffe. Für die Kohlenwasserstoffsynthese bedarf es neben Wasserstoff auch Kohlenstoff, der u. a. als CO₂ aus der Luft gewonnen werden kann.

of hydrogen production through water electrolysis using renewable energy sources depends on power costs and the capital cost of the electrolysis plants. Generation costs come close to being competitive already today under ideal conditions such as those found in the PtG project at the Wyhlen hydroelectric power plant, with its favourable power prices and high annual operating periods.

In order to make water electrolysis and fuel cells more competitive in general further research into alternative materials for catalysts and membranes is needed, including process engineering. Further cost savings can be achieved by using scalable materials and manufacturing processes that are suitable for series production – such as those that are to be developed in the HyFaB project or at the H₂ Wyhlen real-world laboratory.

PRODUCTION OF E-FUELS WITH CO₂ FROM THE AIR

In the future, hydrocarbons will still be needed for a renewable energy supply, especially in areas that cannot be fully electrified, or where hydrogen cannot be used directly. These hydrocarbons include fuels for air traffic, shipping, rail traffic and heavy goods transport, seasonal energy storage and chemical raw materials. In addition to hydrogen, hydrocarbon synthesis also requires carbon, which can be extracted from the air in the form of CO₂.

Die Anreicherung von CO₂ aus Luft ist zwar mit Energieaufwand verbunden, ermöglicht aber im Gegenzug eine standortunabhängige E-Fuels-Produktion. Das Verfahren ist deshalb überall dort von Bedeutung, wo keine Infrastruktur mit konzentrierten CO₂-Quellen vorhanden ist, dafür aber günstiger erneuerbarer Strom sowie genügend Wasser für die Wasserelektrolyse. Im Fokus des vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekts „CORAL“ standen deshalb die Entwicklung und der Machbarkeitsnachweis eines Verfahrens mit minimiertem Energieverbrauch für die CO₂-Gewinnung aus Luft. Durch eine Prozessintegration ist es dabei möglich, die Abwärme aus den verbundenen Prozessschritten wie Elektrolyse und Kraftstoff-(Kohlenwasserstoff-)Synthese zu nutzen. Der verbleibende Stromverbrauch für die CO₂-Bereitstellung aus der Luft (z. B. für Luftgebläse, Pumpen) geht zwar zulasten des elektrischen Wirkungsgrades der E-Fuels-Produktion, der Effizienzverlust hält sich allerdings in Grenzen: So ist die Methangewinnung aus einer konzentrierten CO₂-Quelle wie z. B. einer Biogasanlage mit einem Wirkungsgrad von 60 % nur geringfügig höher als die Methanherstellung unter Verwendung von CO₂ aus der Luft, die einen Wirkungsgrad von 55 % aufweist.

Extracting CO₂ from the air requires energy but in return allows for e-fuel production at any location. The process is thus advantageous at locations where there is no infrastructure with concentrated CO₂ sources, but where cheaper renewable electricity and sufficient water for electrolysis is available. The focus of the “CORAL” project, funded by the German Federal Ministry of Education and Research, was therefore on developing and proving the feasibility of a process with minimised energy consumption for CO₂ extraction from the air. Process integration allows the utilisation of the waste heat from the associated process steps, such as electrolysis and fuel (hydrocarbon) synthesis. Although the residual power consumption for CO₂ production from the air (e.g. for air fans and pumps) negatively affects the electrical efficiency of e-fuel production, the loss in efficiency is limited: for example, methane production from a concentrated CO₂ source, such as a biogas plant with an efficiency of 60%, is only slightly higher than methane production using CO₂ extracted from the air, which has an efficiency of 55%.

WERTSCHÖPFUNG AUS ELEKTROLYSE – EINE SYSTEMANALYTISCHE BETRACHTUNG

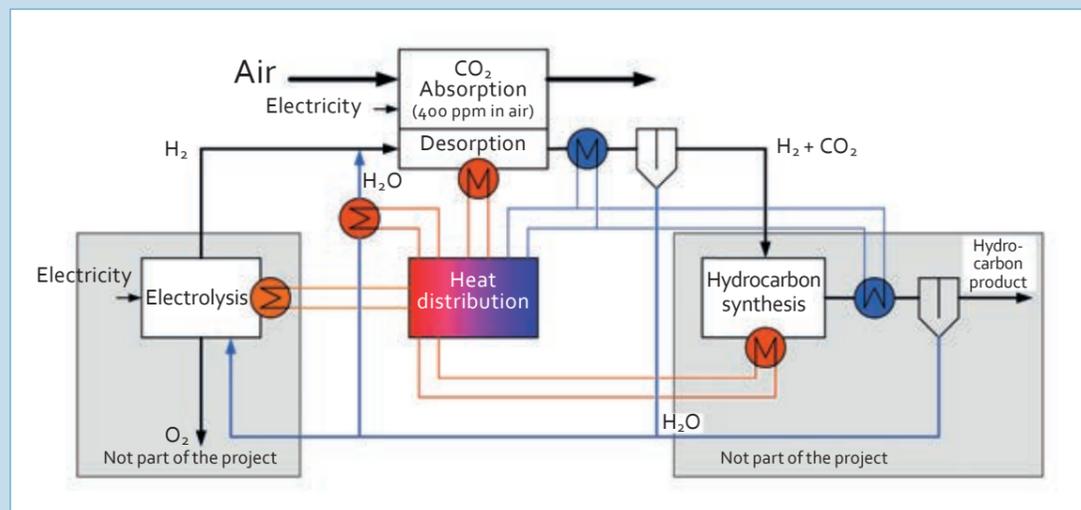
ADDED VALUE FROM ELECTROLYSIS – A SYSTEMS ANALYSIS APPROACH

Im Rahmen der systemanalytischen Forschung am ZSW werden Strategien zu Markteinführung und Entwicklung von neuen Technologien untersucht. Bei der Transformation des Energiesystems und zur zukünftigen Rolle des Wasserstoffs und seiner Syntheseprodukte in den diversen Anwendungsfeldern werden mögliche Entwicklungspfade anhand von Szenarien antizipiert. Um Rückschlüsse auf die erforderlichen technologischen Entwicklungsschritte ebenso wie auf den Markthochlauf ziehen zu können, wird der Zeitverlauf der Nachfrage abgebildet. Die Auswertung wird angesichts der globalen Entwicklungen im Bereich Wasserstoff durch detaillierte Analysen der potenziellen Beschaffungs- und Absatzmärkte für grünen Wasserstoff ergänzt, um die in den Szenarien hinterlegten Annahmen auf Plausibilität zu prüfen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um Wertschöpfungspotenziale für die heimische Industrie zu identifizieren. Im Zentrum stehen hierbei Industriestrukturen mit dem Fokus auf den benötigten Technologien, Komponenten und Fertigungsverfahren sowie dem erforderlichen Know-how.

ZSW investigates strategies for the market introduction and development of new technologies within the framework of systems analytical research. On the basis of scenarios, it anticipates possible development paths for the transformation of the energy system and the future role of hydrogen and its synthesis products in the various fields of application. ZSW maps the development of demand over time in order to be able to draw conclusions on the necessary technological development steps, as well as on the market ramp-up. In view of global developments in the hydrogen sector, it supplements the evaluation with detailed analyses of the potential procurement and sales markets for green hydrogen in order to verify the plausibility of the assumptions underlying the scenarios. The findings obtained are used to identify the value-added potential for the domestic industry. Here, the main emphasis is on industrial structures with a focus on the required technologies, components and manufacturing processes as well as the necessary know-how.

Ziel ist zunächst die Identifikation bereits aktiver Branchen im Themenspektrum Wasserstoffherzeugung und -anwendung, aber auch potenziell geeigneter weiterer Branchen. Das bildet die Grundlage für die Quantifizierung von Wertschöpfungspotenzialen in Abhängigkeit von der weltweiten Ausbaudynamik. Über eine Analyse der Komponentenstruktur, z. B. der Elektrolysetechnologie, werden die spezifischen Vorteile des Industriestandorts Baden-Württemberg erarbeitet. Patentanalysen zu Elektrolysetechnolo-

The initial aim is to identify sectors already active in the area of hydrogen production and application, but also other potentially suitable sectors. This forms the basis for a quantification of value-added potentials depending on the global expansion dynamics. The specific advantages of Baden-Württemberg as an industrial location are worked out by analysing the component structure, for example of the electrolysis technology. Patent analyses of electrolysis technologies and components also offer information on the state of national and international research and development.



// Abwärmennutzung aus dem Elektrolyse- und Syntheseprozess für die CO₂-Bereitstellung aus Luft.
// Utilisation of waste heat from electrolysis and synthesis process for supplying CO₂ from the air.

// Focus

gien und Komponenten geben darüber hinaus Aufschluss über den Stand der Forschung und Entwicklung im nationalen und internationalen Vergleich. Eine Gegenüberstellung der Analyseergebnisse zur Komponentenstruktur mit dem Branchen-Wirtschaftsprofil zeigt vorteilhafte und eher nachteilige Strukturen auf. Ein weiteres Ergebnis eines laufenden Forschungsprojekts ist eine Quantifizierung der Umsatz-, Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale der Elektrolýsetechnologie für Baden-Württemberg bis 2030 und bis 2050 unter Berücksichtigung verschiedener Exportszenarien bzw. erzielbarer Weltmarktanteile. Die Resultate erlauben die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Politik bei der Transformation der baden-württembergischen Industrie hin zur Klimaneutralität unter bestmöglicher Nutzung der Chancen, die sich durch einen dynamisch wachsenden Markt für grünen Wasserstoff ergeben.

A comparison of the results of component structure analyses with the economic profile of the industry reveals advantageous and disadvantageous structures. One further result of an ongoing research project is a quantification of the turnover, value added and employment potential of electrolysis technology for Baden-Württemberg up to 2030 and up to 2050, taking into account various export scenarios and achievable world market shares. The results can be used to derive policy recommendations for the transformation of Baden-Württemberg's industry towards climate neutrality, making the best possible use of opportunities arising from a dynamically growing market for green hydrogen.

insbesondere wenn dieser auf die zu erfüllende Quote für erneuerbare Kraftstoffe anrechenbar ist. Im Verkehrssektor ist der Einsatz von grünem Wasserstoff bzw. von synthetischen Folgeprodukten wie E-Kerosin oder E-Diesel im Flug- und Schiffsverkehr für das Erreichen der Klimaneutralität zwingend notwendig. Auch im Stromsektor ergeben sich weitere Absatzmärkte, zum Beispiel über die saisonale Speicherung von Strom aus erneuerbaren Quellen.

fuels quota. In the transport sector, green hydrogen or synthetic derived products, such as e-kerosene or e-diesel in aviation and shipping, are absolutely necessary to achieve climate neutrality. Additional sales markets are also opening up in the electricity sector, for example through the seasonal storage of electricity from renewable sources.

Das ZSW leistet mit seinen Arbeiten zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung bei der Elektrolýse, zur Bereitstellung von regenerativem CO₂ für synthetische Kohlenwasserstoffe, zur Sicherung der Wasserstoffqualität an Tankstellen, mit der Entwicklung und dem Test von Hochleistungsbrennstoffzellen bis hin zu systemanalytischen Betrachtungen zu Absatzmärkten und Wertschöpfung einen Beitrag zur Industrialisierung von Wasserstofftechnologien. Im Rahmen des Technologietransfers unterstützt das ZSW Unternehmen dabei, an der Umsetzung eines nachhaltigen Wasserstoffpfads nicht nur zu partizipieren, sondern auch davon zu profitieren. Das betrifft nicht nur den in Deutschland traditionell starken Maschinen- und Anlagenbau, dem sich im Kontext der Elektrolýsefertigung und der damit verbundenen Zulieferindustrie neue Absatzchancen – insbesondere im Export – bieten könnten; auch der Chemieindustrie bieten sich neue Optionen, da der grüne Wasserstoff nicht nur als Basischemikalie klimafreundliche Produkte ermöglicht, sondern weil er Wege zur klimaneutralen Produktion eröffnet. Darüber hinaus soll über die industrielle Serienfertigung von Brennstoffzellen die Fahrzeugindustrie unterstützt werden, um nur einige Beispiele zu nennen.

ZSW contributes to the industrialisation of hydrogen technologies with its efforts, such as increasing the efficiency and reducing the costs of electrolysis, providing regenerative CO₂ for synthetic hydrocarbons, assuring the quality of hydrogen at filling stations and developing and testing high-performance fuel cells as well as with its systems analyses of sales markets and value creation. In the context of technology transfer, ZSW helps companies not only to participate in the implementation of a sustainable hydrogen pathway, but also to profit from it. This applies not only to the traditionally strong mechanical and plant engineering sector in Germany, which stands to benefit from new sales opportunities – especially in terms of export – due to electrolysis production and the associated supply industry. There are also new opportunities for the chemical industry, since green hydrogen as a basic chemical not only allows for climate-friendly products but also opens up ways to overall climate-neutral production. In addition, the automotive industry is to be supported by the industrial series production of fuel cells, to name but a few examples.

Die systemanalytische Begleitforschung stellt Orientierungswissen zur Verfügung, etwa für die Politik bei Entscheidungen zur Ausrichtung ihrer Industriepolitik ebenso wie zur Ausgestaltung adäquater Rahmenbedingungen auf dem Weg zur Klimaneutralität.

Accompanying systems analysis research provides guidance, for example to policymakers, to prepare industrial policy decisions and formulate adequate framework conditions on the way to climate neutrality.

FAZIT

Mit dem zunehmenden internationalen Druck, nicht nur einzelne Sektoren klimafreundlicher zu gestalten, sondern ganzen Kontinenten den Weg zur Klimaneutralität zu ebnen, stehen die Zeichen klar auf CO₂-neutralem Wasserstoff. Große Absatzmärkte für H₂ entstehen beispielsweise in der Chemieindustrie, wenn Regularien Klimaneutralität in der Produktion fordern und der bislang aus Erdgasreformierung stammende, fossilbasierte graue Wasserstoff durch grünen Wasserstoff ersetzt wird. In der Stahlindustrie könnte sich ein vollständig neuer Absatzmarkt für „grünen Stahl“ entwickeln. Dessen Herstellung bedarf allerdings grundlegender Prozessumstellungen und entsprechender Investitionen. Raffinerien könnten zu den ersten Abnehmern für grünen Wasserstoff zählen,

SUMMARY

Given the rising international pressure to not just make individual sectors more climate-friendly but also to clear the way for entire continents to become climate-neutral, all signs clearly point to CO₂-neutral hydrogen. Large sales markets for H₂ will emerge in the chemical industry, for example, when regulations demand climate neutrality in production and the fossil-based grey hydrogen previously produced by natural gas reforming is replaced by green hydrogen. The steel industry could see the development of a completely new market for "green steel" – however, its production requires fundamental process changes and corresponding investments. Refineries could be among the first customers for green hydrogen, especially if it counts towards the renewable

// WERTSCHÖPFUNGSKETTE WASSERSTOFF

// VALUE CHAIN HYDROGEN



> ERZEUGUNG VON ERNEUERBAREM STROM
> GENERATION OF RENEWABLE ELECTRICITY



> PRODUKTION VON GRÜNEM WASSERSTOFF
> PRODUCTION OF GREEN HYDROGEN



> WASSERSTOFF-QUALITÄT
> QUALITY OF HYDROGEN



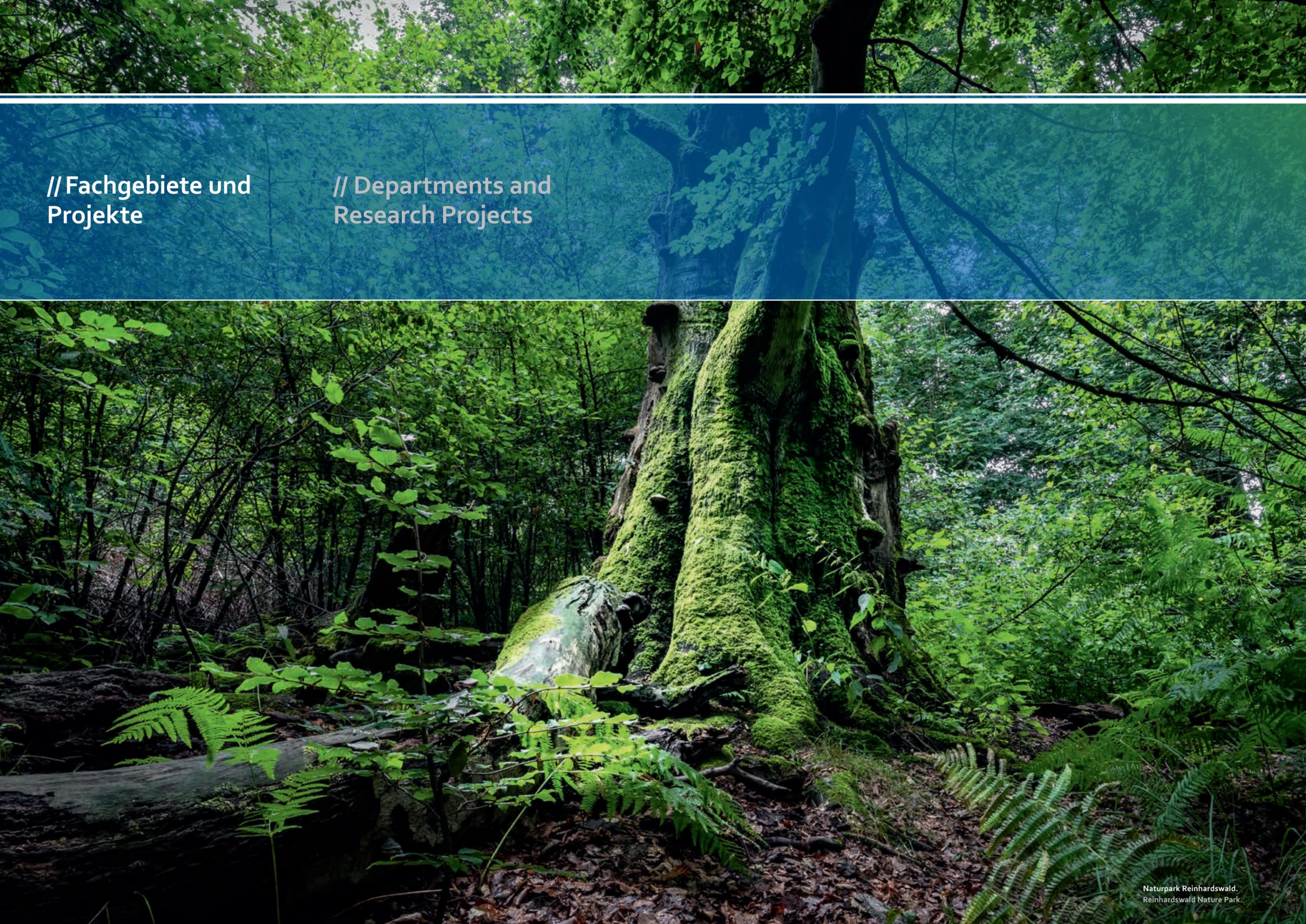
> SYNTHESE VON GRÜNEN E-FUELS
> SYNTHESIS OF GREEN E-FUELS



> TRANSPORT ZUR VERWENDUNG
> TRANSPORT TO APPLICATION



> NUTZUNG: INDUSTRIE, GEBÄUDEENERGIE, MOBILITÄT
> USE: INDUSTRY, ENERGY OF BUILDINGS, MOBILITY

A photograph of a forest scene. The top half of the image is a blue-tinted overlay containing text. The bottom half shows a large tree trunk covered in vibrant green moss, surrounded by lush green foliage and ferns. The ground is covered in fallen leaves and twigs.

// Fachgebiete und
Projekte

// Departments and
Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Nicht erst die Sommerhitze im Jahr 2018, die mit „Heißzeit“ zum Wort des Jahres 2018 wurde, war ein deutliches Indiz dafür, dass der Klimawandel signifikant negative Folgen hat – nicht nur für die Landwirtschaft, sondern gerade auch für die Energiewirtschaft und weitere Bereiche der Volkswirtschaft. Er wird für die Gesellschaft zunehmend spürbar.

Das Fachgebiet Systemanalyse gestaltet mit seinen Arbeiten auf unterschiedlichsten Ebenen die Transformationsprozesse aktiv mit, die für das Erreichen der Klimaschutzziele von Paris (1,5 bzw. maximal 2°C Erwärmung) erforderlich sind. Die strategische Systemanalyse arbeitet dabei intensiv an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik. Sie übernimmt im Kontext der Politikberatung beispielsweise Monitoring- und Evaluationsaufgaben, um Fortschritte ebenso wie Hemmnisse aufzuzeigen, Lösungsräume auszuloten und neue, wirkungsvolle Instrumente zu entwickeln, die die Energiewende und den Klimaschutz auf Bundes- und Landesebene voranbringen. Ergänzt wird dies durch Potenzial- und Entwicklungsanalysen auf Technologieebene und profundes Wissen aus der Innovationsforschung, um robuste Zukunftspfade zu identifizieren und No-Regret-Strategien abzuleiten.

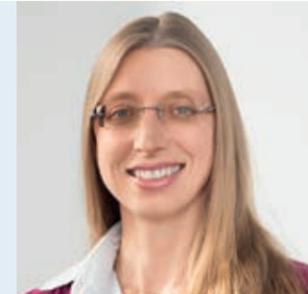
Das Team „Simulation und Optimierung“ setzt verstärkt auf der technischen Ebene an und nutzt Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens für die verschiedensten Anwendungsbereiche – von der Prozessoptimierung in der Photovoltaikproduktion bis zur Bilderkennung für die Entwicklung von technischen Systemen zum Schutz gefährdeter Vogelarten an Windenergieanlagen. Das Team „Windenergie“ arbeitet zusammen mit dem Forschungscluster WindForS intensiv am Aufbau und der Inbetriebnahme des weltweit ersten Windenergieforschungstestfelds in bergig-komplexem Gelände, um zukünftig durch neue Forschungsergebnisse die Energiewende auf dieser Ebene voranzubringen. Hierzu zählt auch die Naturschutzbegleitforschung, die einen eigenen Forschungsschwerpunkt auf dem Testfeld darstellt.

// Our main focus

The summer heat in 2018, inspiring the choice of “Heißzeit” (“hot age”) as Germany’s Word of the Year in 2018, is not the only clear indication that climate change has significantly adverse consequences – not only for agriculture, but also in particular for the energy industry and other areas of the economy. It is becoming increasingly noticeable for society.

With its work at various levels, the Systems Analysis research department is actively shaping the transformation processes required to achieve the Paris climate protection goals (limiting warming to between 1.5 and 2° Celsius). Strategic Systems Analysis works intensively at the interface between science and policy. In providing policy advice, for example, it takes on evaluation and monitoring tasks in order to identify progress and obstacles, explore solution options and develop new, effective instruments to support the energy transition and climate protection at national and regional levels. This is supplemented by potential and development analyses at the technology level and profound knowledge from innovation research in order to identify robust future paths and derive no-regret strategies.

The Simulation and Optimisation team is increasingly focussed on the technical level and uses methods from the machine learning field for a diverse range of applications – from optimising processes in photovoltaic production to image recognition for developing technical systems to protect endangered bird species from wind turbines. The Wind Energy team is working closely together with the WindForS research cluster to build and commission the world’s first wind energy research test site in mountainous and complex terrain in order to advance the energy transition at this level in the future through new research results. This also includes accompanying nature conservation research, which is a separate research focus at the test field.



„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. Maïke Schmidt, Head of Department
E-mail: maïke.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.”

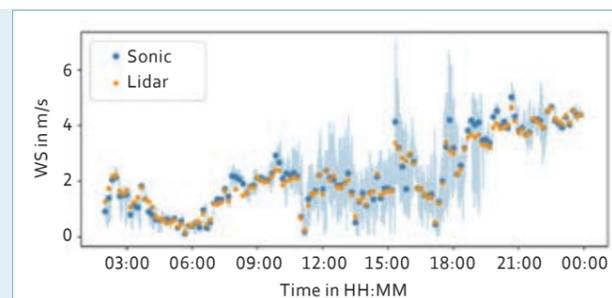


// Messkampagnen am WindForS- Windenergieforschungstestfeld auf der Schwäbischen Alb

Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Verbundforschungsvorhabens WINSSENT wird eine numerische Modellkette zur Strömungssimulation an den geplanten Windenergieanlagen des Windenergieforschungstestfelds entwickelt. Die Kette verbindet großskalige Wettermodelle mit kleinskaligen Strömungsmodellen, die detaillierte Umströmungen – beispielsweise der Rotorblätter – abbilden. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Rotorblattdesigns für komplexe Strömungsverhältnisse zu entwickeln.

Um die einzelnen Modelle der gesamten Kette validieren zu können, bedarf es meteorologischer Daten, die räumlich und zeitlich den Randbedingungen der Modellkette entsprechen. Zur Erhebung dieser Messdaten führen die Projektpartner des KIT, der Eberhard Karls Universität Tübingen, der Hochschule Esslingen und der Universität Stuttgart unter der Koordinierung des ZSW sogenannte Intensive Operation Periods (IOP) am Windenergieforschungstestfeld durch. Diese IOPs sind Zeiträume, in denen sämtliche am Testfeld verfügbaren Messinstrumente in einer aufeinander abgestimmten Messkampagne zum Einsatz kommen. Die IOPs werden vor und nach der Errichtung der Forschungswindenergieanlagen durchgeführt, um deren Einfluss auf die Strömung untersuchen zu können. Neben den umfangreich instrumentierten Messmasten kommen unter anderem autonome Messflugzeuge der Universität Tübingen zum Einsatz. Drei um den Testfeldstandort verteilte laser-optische LiDAR-Messsysteme des ZSW sind in der Lage, räumlich und zeitlich synchronisiert die Windgeschwindigkeit und -richtung über große Entfernungen zu erfassen. Erste Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Instrumenten an den Masten und tragen entsprechend zur Validierung der Modellkette bei.

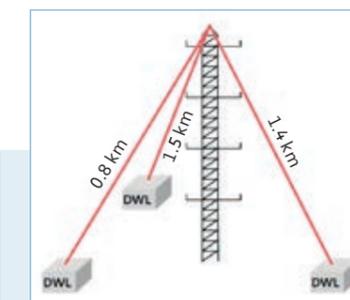
// Vergleich der horizontalen Windgeschwindigkeit aus der synchronisierten LiDAR-Messung und dem Ultraschall-Anemometer auf 96 m am Messmast.
// Comparison of the horizontal wind speed from the synchronized lidar measurement and the ultrasonic anemometer at 96 m at the met mast.



// Measurement runs at the WindForS wind energy research test site on the Swabian Alb

Within the framework of the joint research project WINSSENT, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs, we are developing a numerical model chain for flow simulation at the wind turbines planned for the wind energy test site. The chain combines large-scale weather models with small-scale flow models, which represent detailed flows – for example around the rotor blades. Thus it is possible to develop different rotor blade designs for complex flow conditions.

In order to collect these measurement data, the project partners at KIT, the Eberhard Karls University of Tübingen, the Esslingen University of Applied Sciences and the University of Stuttgart, under coordination of ZSW, are carrying out so-called Intensive Operation Periods (IOP) at the research test site. These IOPs are periods in which all measurement instruments available at the wind energy research test site are used in a coordinated measurement run. The IOPs are carried out before and after the construction of the research wind turbines in order to investigate their influence on the air flow. In addition to the extensively instrumented measuring masts, autonomous measuring aircraft from the University of Tübingen are also used. Furthermore, so-called eddy covariance measuring stations record the energy exchange between soil and atmosphere. Three laser-optical lidar systems from ZSW are distributed around the test site and are capable of measuring the wind speed and directions, synchronised both spatially and temporally over long distances. First results show a very good agreement with the instruments on the masts and thus contribute to the validation of the model chain.



Further information:
www.windfors.de/en/projects/test-site/winsent-weather

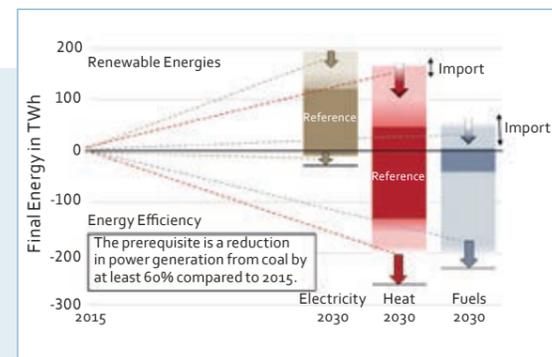
// Andreas Rettenmeier
E-mail: andreas.retteneier@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-229



// Stellungnahme der Expertenkommission zum Zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Energiewende

Das Fachgebiet Systemanalyse unterstützte auch im Jahr 2019 die Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, namentlich Prof. Frithjof Staiß in seiner Funktion als Mitglied der Kommission, bei der Erarbeitung ihrer Stellungnahme zum Zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung zur Energiewende. Die Expertenkommission wies dabei nachdrücklich auf die Verfehlung der Klimaschutzziele für 2020 hin. Noch stärker betonte sie die bereits heute absehbar drohende Zielverfehlung für 2030. Im Rahmen der Stellungnahme wurden die Diskrepanzen zwischen den formulierten Treibhausgasminderungszielen für 2030 und den bislang bekannten Zielen für den Ausbau der erneuerbaren Energien und die Energieeffizienz deutlich herausgearbeitet.

Der Klimaschutz muss zukünftig wesentlich stärker in den Fokus der Energiepolitik der Bundesregierung rücken, wenn die Bundesregierung nicht Gefahr laufen will, von der Rolle des aktiven Gestalters in die des reaktiv Ausführenden gedrängt zu werden. Das Ausrufen des Klimanotstands durch das EU-Parlament, die Bestrebungen der EU-Kommission zu einer Verschärfung der EU-Klimaziele bis 2030 von -40 % auf -50 bis -55 % gegenüber 1990 und die Zielsetzung im Rahmen des Green Deal, Europa zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen, deuten auf eine deutlich stärkere europäische Energiepolitik und wachsenden Druck auf die einzelnen Mitgliedsstaaten hin, nicht zuletzt durch die starken Forderungen der Jugendbewegung Fridays for Future und der Wissenschaft, das 1,5-Grad-Ziel einzuhalten. Die Arbeiten des Fachgebiets zu einem möglichen Zieltabelleau für 2030 sollen in diesem Kontext der Diskussion zur Fortschreibung des Energiekonzepts der Bundesregierung für das Jahr 2030 mit entsprechenden Orientierungen einen Impuls geben (s. Abb. unten).



// Statement by the Expert Commission on the German Federal Government's second progress report on the energy transition

In 2019, the Systems Analysis department continued to support the Expert Commission on the "Energy of the Future" monitoring process, specifically through Professor Frithjof Staiß in his capacity as a member of the commission, in preparing its statement on the German Federal Government's second progress report on the energy transition. The Expert Commission emphatically pointed out the government's failure to meet its climate protection targets for 2020. It emphasised even more strongly its impending failure to meet the 2030 targets, which is already foreseeable today. The statement clearly highlighted the discrepancies between the greenhouse gas reduction targets formulated for 2030 and the targets established to date for expanding renewable energies and energy efficiency.

In the future, the German Federal Government's energy policy must focus much more on climate protection if it does not want to run the risk of losing its role as active shaper to become only a reacting administrator. The EU Parliament's declaration of a climate emergency, the EU Commission's efforts to raise the EU climate targets by 2030 from -40% to between -50 and -55% relative to 1990, and the Green Deal's goal of making Europe the first climate-neutral continent indicate a significantly stronger European energy policy and growing pressure on the individual member states, not least due to the strong demands of the Fridays for Future youth movement and the scientific community, to meet the 1.5 degree target. In this context, the department's work on a possible target table for 2030 should provide impetus for the discussion on continuing the German Federal Government's energy concept for 2030 with corresponding guidance values (see fig. below).

// Erforderliche Veränderung des Endenergieverbrauchs durch Energieeffizienz und erneuerbare Energien bis zum Jahr 2030 einschließlich des Imports von regenerativen Brennstoffen, Einschätzung zu den Flexibilitäten (Pfeile) sowie Referenzentwicklung im Nationalen Energie- und Klimaplan (NECP) (Stand April 2019).
 // Required change in total energy consumption through energy efficiency and renewable energy up to 2030, including the import of renewable fuels, assessment of flexibilities (arrows) and reference development in the National Energy and Climate Plan (NECP) (as of April 2019).

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

// Machine-Learning-Strategie 2025

Im Fachgebiet Systemanalyse werden seit mehr als zehn Jahren Methoden des maschinellen Lernens (ML) entwickelt und u. a. für Einspeiseprognosen von erneuerbaren Energien und zur Energiesystemoptimierung eingesetzt. Darüber hinaus wurden ML-Methoden auch in den klassischen Technologiefeldern des ZSW (z. B. Photovoltaik, Brennstoffzellen, Batterien, Verfahrenstechnik) angewandt. Dabei wird das technologische Domänenwissen mit neuen ML-Methoden zusammengeführt, um die entsprechenden Verfahren und Prozesse zu optimieren.

Das ZSW hat sich auch an dem Förderaufruf des baden-württembergischen Wirtschaftsministeriums für die Einrichtung regionaler KI-Labore beteiligt und war mit dem Projektantrag für die Einrichtung eines „regionalen KI-Labs für Erneuerbare Energien“ (KILEE) erfolgreich. Das regionale KI-Lab soll vor allem kleine und mittlere Unternehmen (sogenannte KMUs) in Baden-Württemberg unterstützen, um mit KI neue Produkte und Dienstleistungen anbieten zu können und damit einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen. Hierfür werden 2020 von den KI-Experten des ZSW Workshops für KMUs veranstaltet und zusammen mit den Firmen exemplarische KI- und ML-Anwendungen entwickelt.

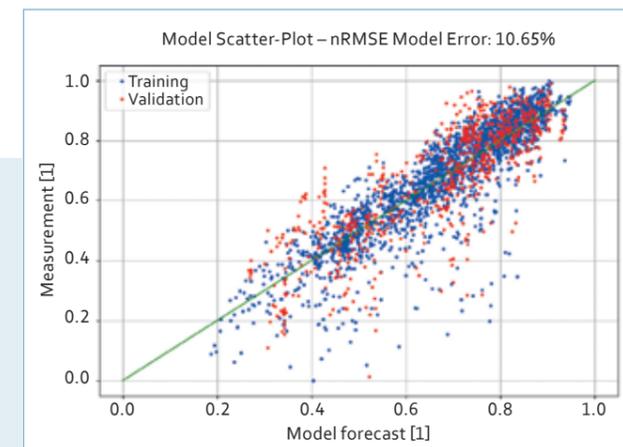
Das neue regionale KI-Lab für Erneuerbare Energien am ZSW ist eine Fortführung und Weiterentwicklung der ZSW-ML-Strategie 2025 für die heimische Industrie.

// Machine Learning Strategy 2025

For more than ten years, machine learning (ML) methods have been developed in the Systems Analysis department and used, among other things, for forecasting the feed-in of renewable energies and optimising energy systems. In addition, ML methods have also been applied in ZSW's traditional technology fields (e.g. photovoltaics, fuel cells, batteries and process engineering). Here, the knowledge in the technological domain is combined with new ML methods in order to optimise the corresponding procedures and processes.

ZSW also participated in the call for proposals held by the Baden-Württemberg Ministry of Economic Affairs for establishing regional AI laboratories and was successful with its project application to establish a "Regional AI Lab for renewable energies" (KILEE). The regional AI lab is primarily intended to support small and medium-sized enterprises (SMEs) in Baden-Württemberg so that they can offer new products and services with AI and thus gain a competitive advantage. For this purpose, workshops for SMEs will be organised by the AI experts at ZSW in 2020 and AI and ML applications will be developed together with the companies, as examples.

The new Regional AI Lab for renewable energies at ZSW is a continuation and further development of ZSW's ML Strategy 2025 for the domestic industry.



// Visualisierung der Qualität des optimierten Modells im Webinterface.
 // Visualisation of the quality of the optimised model in the web interface.

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

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)



// Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschichttechnologien bietet ein hohes Potenzial zur Kostensenkung bei der Herstellung von Photovoltaikmodulen. Insbesondere die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende CIGS-Technologie hat sich in der industriellen Produktion bewährt.

Im Fachgebiet MAT werden CIGS-Module auf Glas mit einer Größe bis 30 x 30 cm² hergestellt und weiterentwickelt. Dabei werden im Unterschied zu einem typischen Laborbetrieb weitgehend Durchlaufprozesse und damit sehr industriennahe Verfahren eingesetzt. Das ermöglicht Verbesserungen an den Prozessen und die Umsetzung neuer Ansätze für den Transfer in die Industrie. Auf flexiblen Substraten wie Polymer- oder Metallfolien entwickeln wir in einem zweiten Technikum im Rolle-zu-Rolle-Verfahren Prozesse für CIGS-Module mit einer beliebigen Länge bei einer Breite bis 30 cm, womit neue Anwendungspotenziale erschlossen werden.

Zum tieferen Verständnis werden grundlegende Arbeiten an CIGS-Solarzellen und den entsprechenden Herstellungsprozessen in typischen Laboranlagen durchgeführt und intensiv mit optischen, elektrischen und materialanalytischen Methoden charakterisiert, bevor sie im Technikum auf die Fläche übertragen werden. Neue Materialsysteme wie Perowskite ermöglichen den Einsatz kostengünstiger Drucktechnologien. Zur Steigerung der Wirkungsgrade forschen wir an Tandemzellen, schwerpunktmäßig in der Kombination Perowskit und CIGS.

Auf Basis der langjährigen Erfahrungen in der Entwicklung und Charakterisierung von CIGS-Solarmodulen bearbeiten wir im Kundenauftrag vielfältige materialanalytische Aufgabenstellungen und die optische und elektrische Charakterisierung von Zellen und Modulen.

// Our main focus

Thin-film technologies offer considerable potential when it comes to reducing the cost to manufacture photovoltaic solar modules. The CIGS technology, based on the elements copper, indium, gallium and selenium, has proven to be particularly suitable for industrial production.

CIGS modules on glass with a size of up to 30 x 30 cm² are produced and refined in the MAT department. In contrast to a typical laboratory, we mainly employ inline processes that are very close to industrial processes. In this way, the process improvements and new approaches we develop are readily available for industrial transfer. In a second laboratory line, we develop processes for CIGS modules of any length with a width of up to 30 cm on flexible substrates such as polymer films or metal foils in a roll-to-roll process, thereby tapping new opportunities for their application.

In order to gain a deeper understanding, fundamental work on CIGS solar cells and the respective manufacturing processes is carried out in typical laboratory facilities and they are subjected to extensive analyses using optical, electrical and material analytical methods before they are upscaled to larger areas in the technical lab. New material systems such as the perovskites allow the use of cost-effective printing technologies. We are conducting research on tandem cells to raise efficiency, with a focus on combining perovskite and CIGS solar cells.

Drawing on many years of experience in the development and characterisation of CIGS solar modules, we also perform a wide range of material analytical tasks as well as optical and electrical characterisations of cells and modules directly for customers.

// Hohe Effizienzen und Abscheideraten für CIGS-Dünnschichtsolarzellen

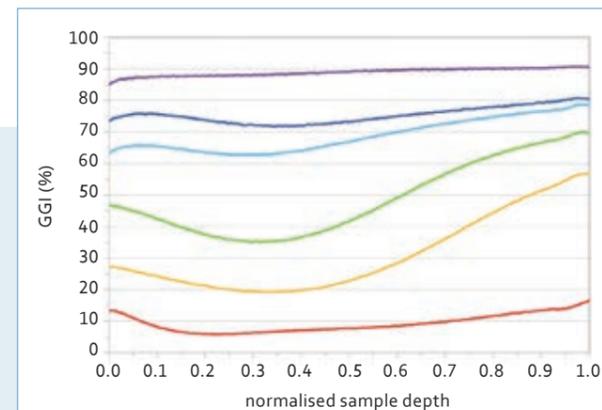
Die Präparation von CIGS-Solarzellen in Durchlaufanlagen ist am ZSW immer auf die beiden Ziele höhere Effizienz und Produktionsnähe ausgerichtet. Das erste Ziel wurde im Projekt CISHiTec des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) verfolgt. Dort wurde der CIGS-Koverdampfungsprozess durch Optimierung der Indium- und Gallium-Wachstumsraten (s. z. B. Abb. unten) sowie des Selen-Angebots verbessert. So konnte mit der Inline-Anlage 2019 eine Solarzelle mit 20,5 % Wirkungsgrad präpariert werden. Ausgehend von diesem Prozess für den CIGS-Absorber wurde die Anlage ergänzt um eine Quelle für Rubidium-Fluorid. Dadurch konnte eine in den letzten Jahren an der Laboranlage sehr erfolgreiche Alkali-Nachbehandlung auch in der Durchlaufanlage realisiert und der Bestwert der Solarzellen auf 21,1 % (in-house-Messung) gesteigert werden. Basierend hierauf erfolgen weitere industriennahe Entwicklungen dieses Prozesses für Verbesserungen in der CIGS-Modulproduktion.

Für die Produktionsnähe ist es entscheidend, das lichtabsorbierende CIGS-Material in möglichst kurzer Zeit abzuschneiden. Im BMWi-Projekt speedCIGS werden zusammen mit sechs Partnern maximale Wachstumsraten ermittelt. Prozessoptimierungen erfolgen vor allem durch detaillierte Untersuchungen des Wachstumsverlaufs innerhalb der Anlage, u. a. mit Rasterelektronenmikroskop-Bildern der Kornstruktur sowie mit einer Tiefenprofilierung der Zusammensetzung mittels GD-OES (glow discharge optical emission spectroscopy). So konnten bereits 2,2 µm dünne CIGS-Schichten in nur ca. 7 Minuten für Solarzellen präpariert werden, die bei Fertigstellung mit einer Effizienz von 17,3 % eine weiterhin hohe elektro-optische Qualität zeigten.

// High efficiency levels and deposition rates for CIGS thin-film solar cells

The preparation of CIGS solar cells in the inline systems at ZSW is always aligned with the two goals of improved efficiency and proximity to production. The first of these aims was targeted in the CISHiTec project initiated by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). In this project, the CIGS co-evaporation process was improved by optimising indium and gallium deposition rates (see, for example, the fig. below) and the availability of selenium. As a result, in 2019 the inline plant was able to produce a solar cell with an efficiency of 20.5%. The plant was fitted with a rubidium fluoride source based on the process for the above-mentioned CIGS absorber. As a result, an alkali post-treatment process, which has in recent years been proven to be very successful in the laboratory plant, was implemented in the inline system and raised the best value for solar cells to 21.1% (in-house measurement). Based on this status, further industry-oriented developments of this process are being made, to achieve improvements in CIGS module production.

For the purpose of production relevance, it is important to deposit the light-absorbing CIGS material in the shortest possible time. Within the BMWi project speedCIGS, ZSW and six partners are currently working to determine the maximum possible growth rates. Process optimisation is primarily realised through detailed analyses of the growth process within the plant, including scanning electron microscope imaging of the grain structure and depth profiling the composition using GD-OES (glow discharge optical emission spectroscopy). Within this project, we have already been able to produce 2.2-µm-thin CIGS layers for solar cells in just approximately 7 minutes, which, when finished, still exhibited a high electro-optical quality with an efficiency of 17.3%.



// Beispiel für eine gezielte Variation des tiefenabhängigen GGI-Verhältnisses $(c(\text{Ga})/(c(\text{Ga})+c(\text{In})))$ innerhalb mehrerer Proben eines Prozesses an der Durchlaufanlage.
 // Example of a targeted variation of the depth-dependent GGI ratio $(c(\text{Ga})/(c(\text{Ga})+c(\text{In})))$ in several samples of one process on the continuous line.



„Photovoltaik ist aktiver Klimaschutz. Darum unterstützen wir unsere Partner bei der Herstellung effizienter, umweltfreundlicher und kostengünstiger CIGS-Dünnschichtsolarmodule.“

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

“Photovoltaics is active climate protection. This is why we support our partners in the production of efficient, environmentally friendly and cost-effective CIGS thin-film solar modules.”

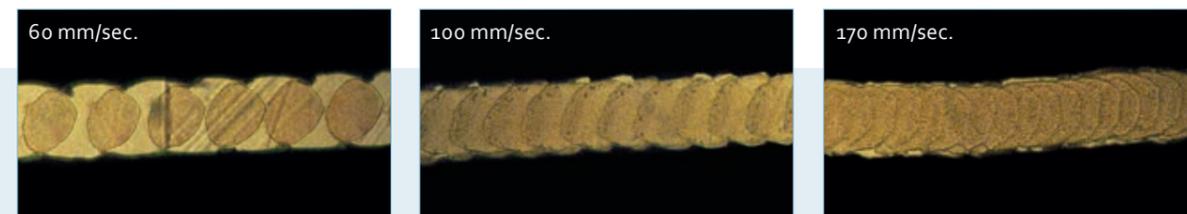
// Dr. Stefan Paetel
 E-mail: stefan.paetel@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-237



// Rückkontakt-Strukturierung bei flexiblen CIGS-Dünnschichtsolarzellen im Rolle-zu-Rolle-Verfahren

In der Rolle-zu-Rolle-Anlage (R2R) zur Herstellung flexibler CIGS-Dünnschichtsolarzellen werden alle Schichten nacheinander im gleichen Vakuum abgeschieden. Die Herstellung monolithisch verschalteter Module stellte bisher jedoch eine Herausforderung dar, da für den Strukturierungsprozess die R2R-Prozessierung unterbrochen werden musste. Durch die Implementierung einer R2R-kompatiblen Rückkontakt-Strukturierung (P1) konnte die Modulherstellung nun erheblich erleichtert werden. Dabei wurde ein Blindflansch am Boden der Anlage durch ein rechteckiges Quarzglas ersetzt, durch das die Strukturierung mittels eines energiereichen Picosekundenlasers (ps-Laser) durchgeführt werden kann. Während der ps-Laser außen an der R2R-Anlage fest montiert ist, wird der Laserstrahl über mehrere Umlenkspiegel und eine x-Verfahrenheit über das Quarzfenster in die Vakuumanlage eingeführt, wo er quer zur Bandlaufrichtung den ein- oder mehrlagigen molybdänbasierten Rückkontakt strukturiert. Da die Schichtauftrennung parallel zur CIGS-Beschichtung, d. h. ohne Unterbrechung der R2R-Abscheidungsprozesse stattfindet, wurde als Beschichtungsschutz noch ein weiteres spezielles, auf >400 °C beheizbares Quarzglas vorgeschaltet, sodass sich kein Selen abscheiden und den Laser abschwächen kann.

Die Herausforderung bei der Strukturierung liegt darin, eine hochtemperaturfeste, reflektierende Metallschicht (Rückkontakt) von einer 25 µm dünnen und temperaturempfindlichen Polymerfolie (Polyimid) als Trägermaterial für die CIGS-Schicht so zu entfernen, dass die Folie nicht zerstört oder beschädigt wird. Deshalb wurden verschiedene Details modifiziert. Letztlich konnten so auf 10 x 10 cm² großen Polymersubstraten, die eine R2R-Strukturierung des Rückkontakts im Vakuum erfahren haben, Module mit einem Wirkungsgrad von bis zu 12,0 % hergestellt werden.



// Laserstrukturierung im R2R-Verfahren im Vakuum auf Polymerfolie mit unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeit des Picosekundenlasers.

// Laser patterning with the R2R process in a vacuum on polymer film with different picosecond laser feed rates.

// Patterning the back contact of flexible CIGS thin-film solar cells in the roll-to-roll process

In the roll-to-roll (R2R) system for the production of flexible CIGS thin-film solar cells, all layers are successively deposited within the same vacuum. Up until now, the production of monolithically interconnected modules has been a challenge because the R2R process had to be interrupted for the structuring process. By implementing the R2R-compatible back-contact patterning (P1), we were able to significantly simplify module production. A blind flange at the bottom of the system was replaced by a rectangular piece of quartz glass through which the patterning process can be carried out using a high-energy picosecond laser (ps laser). While the ps laser is rigidly and externally mounted on the R2R system, the laser beam is introduced into the vacuum system through the quartz window via several deflecting mirrors and an x-traversing unit, where it patterns the single- or multi-layer molybdenum-based back contact at a right angle to the web transport direction. Since the layer separation occurs at the same time as the CIGS coating without any interruption of the R2R deposition processes, a second special piece of quartz glass which can be heated to over 400 °C was added to prevent selenium from being deposited on the laser window, thereby weakening the laser's potency.

The challenge during the patterning process is to selectively remove the high-temperature resistant, reflective metal layer (back contact) from a 25-µm-thin and temperature-sensitive polymer film (polyimide) which serves as the substrate for the CIGS layer stack in such a way that the film is neither destroyed nor damaged. Various details were modified for this reason. Eventually, modules with an efficiency of up to 12.0% were produced on 10 x 10 cm² polymer substrates that underwent R2R-patterning of the back contact in a vacuum.

// Dr. Friedrich Kessler

E-mail: friedrich.kessler@zsw-bw.de

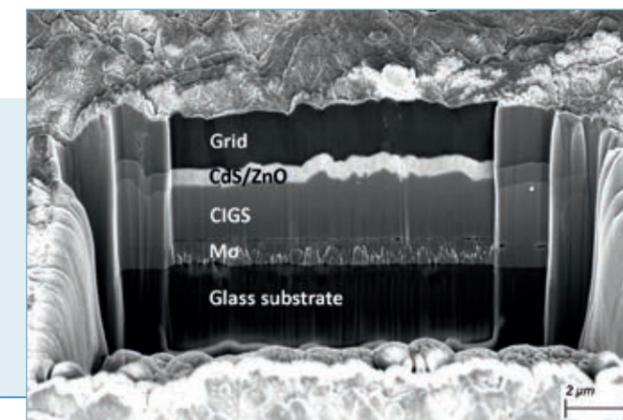
Phone: +49 711 7870-201

// Blick in die Nanoebene: verbesserte Charakterisierung von Dünnschichtsolarzellen

Ein neues Rasterelektronenmikroskop (REM) am ZSW wurde speziell für die Anforderungen der Forschung an Dünnschichtsolarzellen konzipiert und konfiguriert. Hiermit sind mikroskopische Aufnahmen mit einer Auflösung bis in den Subnanometerbereich und auch von magnetisierbaren Materialien möglich. Letzteres ist für die Entwicklung von flexiblen Solarzellen auf Stahlsubstraten wichtig.

Zusätzlich zur Basisfunktion der hochauflösenden Bildgebung sind weitere Funktionen im Gerät integriert. Das REM ist mit einem FIB (Focused Ion Beam) ausgerüstet, um einen definierten Strahl von Ga-Ionen auf die Probe zu lenken. Je nach Leistung kann der FIB-Strahl zur Abbildung oder auch zum Abtrag der Probe verwendet werden. Auf diese Weise lassen sich Querschnitte durch das Schichtsystem an beliebiger Stelle herauspräparieren und untersuchen. Mit einem schnellen EDX-System (energiedispersive Röntgenspektroskopie) wird die elementare Zusammensetzung untersucht. Tatsächlich ermöglicht eine definierte Abfolge an REM-Aufnahmen an sequentiellen Schnitten durch eine Probe eine 3-D-Ansicht. Zusammen mit dem EDX sind sogar 3-D-Aufnahmen der Zusammensetzung möglich. Ebenso können Lamellen für Durchsichtsaufnahmen präpariert werden.

Da die Absorberschichten in CIGS-Solarzellen zu Artefakten neigen, wenn sie mit einem FIB-Strahl bearbeitet werden, ist zusätzlich ein Kryo-Stage vorhanden. Die dadurch mögliche Kühlung mit flüssigem Stickstoff reduziert die Bildung der Artefakte und erlaubt so eine möglichst unverfälschte Untersuchung. Die Anschaffung des Gerätes wurde durch einen Zuschuss des Landes Baden-Württemberg ermöglicht.



// Das Rasterelektronenmikroskop neuer Generation im ZSW-Labor.
// The latest-generation scanning electron microscope in the ZSW laboratory.

// Zooming into the nano-scale: improved characterisation of thin-film solar cells

A new scanning electron microscope (SEM) at ZSW was designed and configured specifically for the requirements of research on thin-film solar cells. It is capable of producing microscopic images with a resolution down to the sub-nanometre range, even of magnetisable materials. The latter is important when it comes to developing flexible solar cells on steel substrates.

In addition to the core function of high-resolution imaging, further functions have been integrated into the device. The SEM is fitted with an FIB (focused ion beam) to direct a defined beam of Ga ions onto the sample. Depending on the intensity, the FIB can be used to image or ablate the sample. This means that cross-sections can be prepared at any place on the solar cell stack for further examination. Elemental composition is analysed with a high-speed EDX system (energy-dispersive X-ray spectroscopy). A defined sequence of SEM images of successive cuts through a sample provides a three-dimensional view. In conjunction with EDX, 3D compositional analysis of the structures is possible. Lamellae can also be prepared for transmission electron images.

Since the absorber layers in CIGS solar cells tend to form artefacts when they are processed with an FIB beam, an additional cryogenic stage is included. By cooling to liquid nitrogen temperatures, it is possible to reduce the formation of artefacts and thus prepare samples for analysis with a minimum of distortions. The acquisition of the device was made possible by a grant from the federal state of Baden-Württemberg.

// Schnitt mit dem Rasterelektronenmikroskop durch eine CIGS-Dünnschichtsolarzelle.

// A cross-section through a CIGS thin-film solar cell using a scanning electron microscope.

// Dr. Theresa Magorian Friedlmeier

E-mail: theresa.friedlmeier@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-293

// Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)



// Risse entlang der Zellenverbinder in der Polyamid-Rückseitenfolie eines PV-Moduls.
// Cracks along the cell connectors in the polyamide back sheet foil of a PV module.

// Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung der Qualität und Stabilität von Photovoltaikmodulen (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. Einen neuen Schwerpunkt bilden Analysen von Qualitätsproblemen von polymerbasierten Modulrückseiten. Betroffene Module werden sowohl im Testlabor als auch direkt im Solarpark vor Ort untersucht.

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 von finanzierenden Banken, von Projektierern oder Betreibern.

Photovoltaiksysteme tragen wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung bei. Die geeignete Verknüpfung mit elektrischen Speichern, die Kopplung der Sektoren und Verschiebung von Lasten erhöhen die lokale Nutzung von Solarstrom, entlasten die Verteilnetze und tragen dezentral zum Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch bei. Die Analyse entsprechender Potenziale sowie die Entwicklung von Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten, einschließlich des geeigneten Lademanagements für die Elektromobilität, sind daher weiterführende Themen. Das Fachgebiet berät bei der Entwicklung und Anwendung entsprechender Algorithmen. In Zusammenarbeit mit dem ZSW-Fachgebiet Systemanalyse werden Prognosen von Erzeugung, Last und Flexibilität für den optimierten Netzbetrieb, den Datenaustausch zwischen den Netzbetreibern und für den Energiemarkt geliefert.

// Our main focus

Ensuring the quality and stability of photovoltaic (PV) modules and an efficient use of solar power in the energy supply system are the two major focus areas of the department and its customers. Based on 30 years of experience with testing 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. Analyses of quality issues affecting the polymer-based back sheets of modules form a new focus. The affected modules are examined both in the test laboratory and directly on-site in the solar farm.

Our consultancy expertise not only encompasses quality control for PV modules and impact analyses of disruptive factors (climate, mechanical loads, soiling and electrical voltage), but also inspections (“due diligence“) of large-scale PV installations and PV production facilities on behalf of financing banks, project developers and operators.

Photovoltaic systems make a significant contribution to sustainable power generation. Appropriate linking with electrical storage systems, sector coupling and load shifting increase the local use of solar power, relieve the distribution networks and contribute to a decentralised balance of power generation and consumption. Analyses of corresponding potentials as well as the development of algorithms for the optimised operation of generators, storage systems and loads, including suitable charging management for e-mobility, are therefore further topics addressed by the research department. The department advises on the development and testing of corresponding algorithms. In cooperation with ZSW’s Systems Analysis department, forecasts of generation, load and flexibility are provided for optimised grid operation, the exchange of data between grid operators and for the energy market.

// Rückseitenfolien von Photovoltaikmodulen

PV-Module sind sehr zuverlässige und langlebige Komponenten, die in der Regel umfangreich getestet und zertifiziert wurden, bevor sie im Feld in Betrieb gegangen sind. Dennoch zeigen sich nach nur etwa fünf bis acht Jahren Betrieb an bestimmten polymerbasierten Rückseitenfolien von PV-Modulen teils harmlos erscheinende Auffälligkeiten wie Verfärbungen oder Auskreiden der Oberfläche, aber auch deutliche Schäden wie Risse (s. Abb. oben rechts). Dies kann zum elektrischen Isolationsfehler im Modul und in Folge zum Verlust der Betriebssicherheit eines PV-Parks führen.

In unserem Testlabor Solab wurde für dieses Thema ein Analyse- und Prüfpaket entwickelt, mit dem die sichtbaren, aber auch die verborgenen Mängel der Rückseitenfolie festgestellt und bewertet werden können. Dieses Paket umfasst neben der visuellen Inspektion, der Leistungsmessung und der Isolationsmessung des PV-Moduls insbesondere eine Bruchdehnungsprüfung und einen Abschältest. Exemplarisch ist in der Abbildung unten das Ergebnis der Bruchdehnungsprüfung einer im Feld gealterten Polyamid-Rückseitenfolie gezeigt. Während die Werte für die Bruchdehnung in Maschinenrichtung (MD) sehr gut sind, haben sie in transversaler Richtung (TD) stark abgenommen. Wird die Folie also in dieser Richtung z. B. durch Temperaturwechsel mechanisch beansprucht, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass Risse in der Rückseite auftreten. Meist sind diese dann in Bereichen zwischen den Zellen oder entlang der Zellenverbinder zu finden.

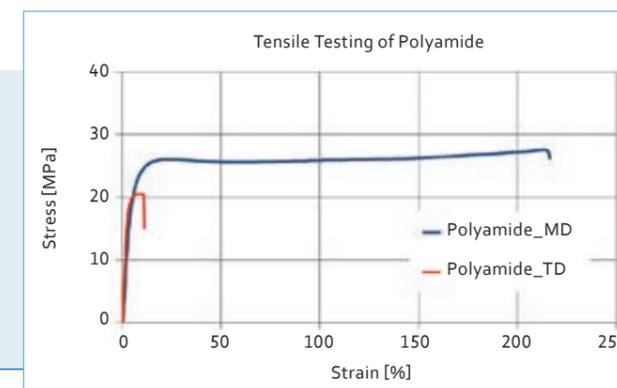
Eine weitere wichtige Serviceleistung ist die frühzeitige Identifizierung von fehleranfälligen Polymer-Rückseitenfolien bereits im Solarpark. Dazu wird in einem Stichprobenverfahren mit einem portablen Fourier-Transformations-Infrarotspektroskop (FTIR) die Rückseitenfolie untersucht. Im günstigen Fall wird nach diesem Qualitätscheck dem Kunden signalisiert, dass kein Schadensrisiko bezüglich der Rückseite seiner PV-Module besteht.

// Back sheets in photovoltaic modules

PV modules are highly reliable and durable components that are generally extensively tested and certified before they are put into operation in the field. Nevertheless, after only about five to eight years of operation, certain polymer-based back sheets in PV modules exhibit not only seemingly harmless irregularities such as surface discolouration or chalking, but also significant damage such as cracks (see fig. above right). This can result in an electrical insulation fault in the module and consequently in loss of the operational reliability of a PV farm.

Our Solab testing laboratory has developed an analysis and inspection package for this issue, with which the visible as well as the hidden defects of the back sheet can be identified and evaluated. In addition to a visual inspection of PV modules, power measurement and insulation measurement, this package includes in particular an elongation at break test and a peel test. As an example, the figure below depicts the result of the elongation of a field-aged polyamide back sheet at break test. While the values for elongation at break in the machine direction (MD) are very good, they have decreased sharply in the transverse direction (TD). If the film were to be subjected to mechanical stress in this direction, for example due to temperature changes, there is a high probability of cracks occurring on the rear side. In most cases, these cracks occur in areas between the cells or along the cell connectors.

Another important service that we provide is the early detection of fault-prone polymer back sheets already installed in solar farms. The back sheet is analysed in a random sampling procedure using a portable Fourier transform infrared spectroscope (FTIR). In favourable cases following the quality check, customers are informed that there is no risk of damage to the back of their PV modules.



// Bruchdehnungstest an einer gealterten Polyamid-Rückseitenfolie.
// Elongation at break test on an aged polyamide back sheet.



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

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

“Tapping the sun, photovoltaics delivers electricity worldwide into grids or to be used locally. We focus on the quality of the solar modules and the efficient use of solar power in the electricity, heat and mobility sectors.”

// Peter Lechner
E-mail: peter.lechner@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-254



// Photovoltaik und intelligente Ladesteuerung für Elektromobilität

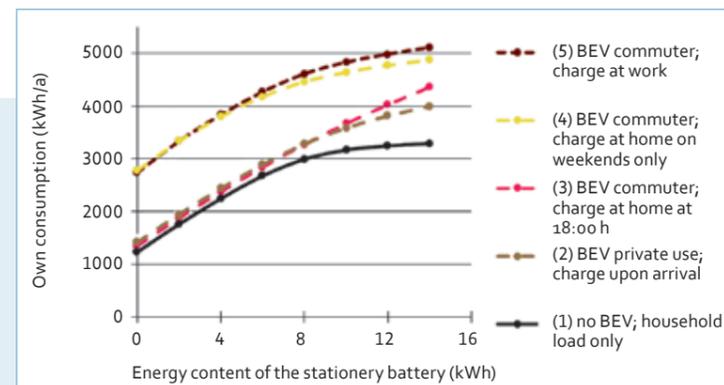
Ein wesentlicher Faktor für die Verbesserung des CO₂-Fußabdrucks von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) ist das Laden der Batterie aus erneuerbaren Energiequellen, etwa mit Hilfe einer Dach-PV-Anlage eines Wohngebäudes. Bilanzuell reicht eine PV-Anlage von rund 7 kWp aus, um den typischen Hausstrombedarf von 4 MWh pro Jahr plus 3 MWh pro Jahr für eine Fahrstrecke von 15.000 km eines E-Fahrzeugs zu liefern. Insbesondere Pendler kommen jedoch mit ihrem Fahrzeug typischerweise abends zuhause an, wenn die PV-Anlage wenig oder keinen Strom mehr liefert.

Die Abbildung unten ist das Ergebnis einer Simulation mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten für die Stromerzeugung aus einer PV-Anlage mit einer Leistung von 10 kWp sowie einer simulierten Haushaltslast mit und ohne zusätzliche Last durch Elektroautos. Zunächst erhöht ein stationärer Hausspeicher den Eigenverbrauch des Solarstroms ohne Elektrofahrzeug bis zu einem Energiegehalt von 8 kWh linear, um danach in der Steigung abzufallen. Eine wesentliche Erhöhung des Eigenverbrauchs tritt hier durch das E-Fahrzeug erst ab etwa 8 kWh auf. Wirkungsvoller ist ein geeignetes Lastmanagement, d.h. hier das Laden über Tag, welches für einen Pendler durch Laden am Wochenende erreicht werden kann. Ideal wäre es, wenn die zeitgleiche Einspeisung des Solarstroms vom eigenen Haus ins Netz auch beim Laden am Arbeitsplatz als Eigenverbrauch angerechnet würde. Unabhängig von der stationären Batterie zuhause ergeben sich rund 20 % Erhöhung des Eigenverbrauchs von Solarstrom. Wie dieses einfache Beispiel zeigt, sind smarte übergeordnete Lösungen für die Ladesteuerungen wichtig, um Energie aus regenerativen Quellen optimal zu nutzen und die Netzbelastung zu reduzieren. Solche Lösungen werden vom ZSW in den vom Land und Bund geförderten Projekten eLISA-BW bzw. LINOx entwickelt und umgesetzt.

// Photovoltaics and smart charge control for e-mobility

Charging the battery with renewable energy sources, such as roof-mounted PV systems on residential buildings, is a key factor when it comes to improving the carbon footprint of battery electric vehicles (BEV). In terms of balance, a PV system with around 7 kWp is enough to supply a typical household's electricity requirement of 4 MWh per year plus 3 MWh per year for a driving distance of 15,000 km with an electric vehicle. However, commuters in their vehicles typically arrive at home in the evening when the PV system is supplying little to no power.

The figure below shows the result of a simulation with a temporal resolution of 15 minutes for electricity generation using a PV system with an output of 10 kWp and a simulated household load with and without additional load from electric cars. Initially, a stationary household storage system increases self-consumption of solar electricity without an electric vehicle linearly up to an energy content of 8 kWh and then it levels off. A significant increase in self-consumption only appears at about 8 kWh or more owing to the electric vehicle. Appropriate load management is more effective, which in this case would be recharging during the day – something a commuter can do by charging over the weekend. It would be ideal if simultaneous feed-in of solar power from one's own home into the grid were to be counted as self-consumption when charging at work. This would result in an increase of about 20% in self-consumption of solar power irrespective of the stationary battery at home. As this simple example shows, smart higher-level charge control solutions are important to ensure an optimal use of energy from renewable sources and to reduce load on the grid. ZSW develops and implements these kinds of solutions in the eLISA-BW and LINOx projects funded by the state and federal governments.



// Eigenverbrauch von Solarstrom abhängig vom Energiegehalt einer stationären Batterie für verschiedene Anwendungsfälle mit und ohne E-Fahrzeug (BEV).
 // Self-consumption of solar power depending on the energy content of a stationary battery for different applications with and without an electric vehicle (BEV).

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

// Lokale Solarstromerzeugung und prädiktiver Netzbetrieb

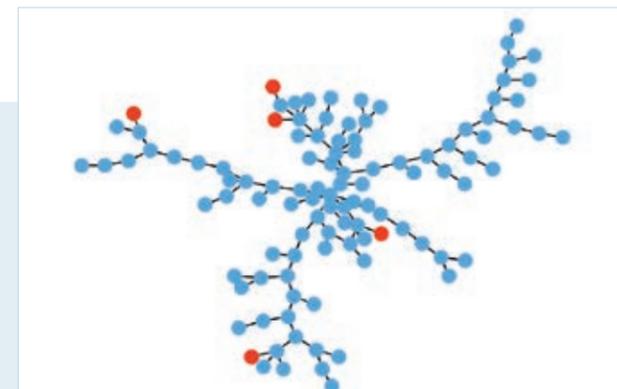
Der steigende Anteil von lokaler Stromerzeugung aus regenerativen Quellen trägt zunehmend zur Deckung des lokalen Verbrauchs bei und führt zu Rückspeisungen in das Verteil- und Mittelspannungsnetz. Das ZSW hat in verschiedenen Forschungsprojekten Methoden und Bausteine entwickelt, um auch bei hohen Anteilen fluktuierender Einspeisung im Niederspannungsnetz den Energiefluss, den resultierenden Netzzustand und insbesondere Spannungsbandverletzungen korrekt prognostizieren zu können. Dabei wurden Verfahren zur Prognose von Solarstromerzeugung und Haushaltslast mit einer netzbezogenen Gruppierung von Haushaltsanschlüssen kombiniert, um die hohe Unsicherheit von Einzelprognosen durch eine Aggregation mehrerer Anschlüsse zu reduzieren. Für die Netzberechnung wurde ein rechenoptimiertes Verfahren entwickelt, das die Propagation von Prognoseunsicherheiten mitbetrachtet.

Im Ergebnis können die entwickelten Algorithmen in die vorausschauende Optimierung des Netzbetriebs eingebunden werden. Bei dieser wird etwa durch gezielte Platzierung und Steuerung verteilter Speicher das Abregeln von Erzeugungsleistung zur Vermeidung von Spannungsbandverletzungen im Netz minimiert (s. Abb. unten). Weiterhin wurde untersucht, welche Messpunkte die Unsicherheiten in der Netzzustandsberechnung am effektivsten reduzieren. Die so entwickelte Steuerung realer dezentraler Speicher wurde im vom BMWi geförderten Projekt „Grid-Predict“ umgesetzt. Dabei gelang es zudem, die künftig Smart-Meterkonformen Protokolle und Wege für die Kommunikation zwischen einer Leitwarte und dezentralen Geräten zu verwenden. All dies wurde für ein Teilnetz mit 120 Haushalten der Stadtwerke Ulm Netze GmbH, das in einer Testleitwarte an der Hochschule Ulm abgebildet war, simuliert und die intelligente Steuerung exemplarisch für im Labor nachgebildete Haushalte erfolgreich umgesetzt.

// Local solar power generation and predictive grid operation

The rising share of local power feed-in from renewable sources is increasingly used to cover local consumption and it leads to feed back into the distribution network and medium-voltage grid. ZSW has developed methods and modules in various research projects to correctly predict energy flow, the resulting grid state and especially voltage band violations, even with a high proportion of fluctuating feed-in in the low-voltage grid. Methods for forecasting solar power generation and household load were combined with a grid-related grouping of household connections in order to reduce the high uncertainty of individual forecasts by aggregating several connections. A computationally optimised method was developed for the grid calculation that takes into account the propagation of forecast uncertainties.

The developed algorithms can be integrated into the predictive optimisation of grid operation. Reductions of generation capacities to avoid voltage band violations in the grid are kept to a minimum (see fig. below) through targeted placement and control of distributed storage systems. The exact measurement points that would most effectively reduce uncertainties in the grid state calculation were also investigated. The control of real-world decentralised storage systems developed as a result was implemented in the “Grid Predict” project sponsored by BMWi. It also succeeded in using the future smart metre-compliant protocols and pathways for communication between a control room and decentralised devices. All of this was simulated for a sub-network – reproduced in a test control room at Ulm University of Applied Sciences – consisting of 120 households supplied by Stadtwerke Ulm Netze GmbH, and the smart control system was successfully realised for these virtual households.



// Optimale Platzierung von fünf Batteriespeichern (rot) zur Vermeidung von Abregelungen bei hoher PV-Einspeisung.
 // Optimal placement of five battery storage systems (red) to avoid reductions in generative capacity at times of high PV feed-in rates.

// Benjamin Matthiä
 E-mail: benjamin.matthiess@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-272

// Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)

Renewable Fuels and Processes (REG)



// Unsere Kernkompetenzen

Die Kernkompetenzen des Fachgebiets Regenerative Energieträger und Verfahren sind die Erzeugung regenerativer Brenn- und Kraftstoffe im Kontext von Power-to-X (P2X) sowie die Realisierung geschlossener Stoffkreisläufe, z. B. mit Verfahren zum Phosphor-Recycling.

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

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

Mit unserem Engineering- und System-Know-how haben wir bereits drei eigene Power-to-Gas- bzw. Elektrolyseanlagen in den Leistungsklassen 25 kW_{el}, 250 kW_{el} und 1 MW_{el} am ZSW errichtet und beraten Industriekunden vom Basic Engineering bis zur Inbetriebsetzung kommerzieller Anlagen wie auch beim anschließenden Technologiemonitoring.

Neben unseren P2X-Aktivitäten entwickeln wir innovative Verfahren zum Thema Reststoffverwertung und Rohstoffrecycling. So erforschen wir Konzepte zum Recycling von Phosphor bzw. zur rohstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen.

// Our main focus

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

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

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

Thanks to our engineering and systems expertise, we have already built three of our own Power-to-Gas and electrolysis plants on the 25 kW_{el}, 250 kW_{el} and 1 MW_{el} scale at ZSW and provide consulting services to industry customers on everything from basic engineering and commissioning of commercial plants to subsequent technology monitoring.

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

// CORAL – CO₂-Rohstoff aus Luft

Für die erneuerbare Energieversorgung werden auch zukünftig Kohlenwasserstoffe benötigt, insbesondere in Bereichen, die nicht vollständig elektrifizierbar sind oder in denen Wasserstoff nicht direkt genutzt werden kann. Das betrifft z. B. Kraftstoffe für den Flug-, Schiffs-, Bahn- und Schwerlastverkehr, saisonale Energiespeicher und chemische Rohstoffe. Für die Kohlenwasserstoffsynthese bedarf es neben Wasserstoff auch Kohlenstoff, den man regenerativ aus Biomasse oder als CO₂ aus der Luft gewinnen kann. Die Prozesse sind z. T. mit einem erheblichen Energieaufwand verbunden. Im Fokus von „CORAL“ steht deshalb die Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Gewinnung von Luft-CO₂ mit minimiertem Energieverbrauch.

Im Vergleich zur gewonnenen CO₂-Menge muss ein großer Luftvolumenstrom mittels Gebläse durch einen Absorber gefördert werden, was abgesehen von der Desorption den elektrischen Hauptverbrauch verursacht. Im CORAL-Projekt wird zur Demonstration ein Waschprozess mit einer wässrigen Aminlösung eingesetzt. Die Abbildung oben zeigt die verwendeten De- und Absorber, welche in einem 20-ft-Container untergebracht sind.

Das Verfahren zeichnet sich durch einen effizienten, integrierten Gesamtprozess mit der Möglichkeit zur Abwärmenutzung aus nachgelagerten Prozessschritten wie Elektrolyse und Synthese aus und ist dadurch prädestiniert zur regenerativen Bereitstellung von Kohlenstoff für die großtechnische E-fuels-Produktion. Der Prozess ist neben dem geringen elektrischen Energiebedarf aufgrund seiner verfahrenstechnischen Charakteristika vor allem auch sehr gut für einen Scale-up in große Leistungsklassen geeignet. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme CO₂Plus gefördert.

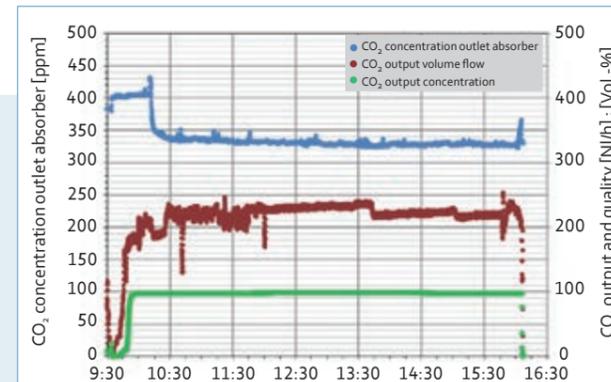
// CO₂-Desorber (links); CO₂-Absorber (rechts) für 0,5-1 m³/h CO₂; 3.600 m³/h Luft.
// CO₂ desorber (left); CO₂ absorber (right) for 0.5 – 1 m³/h CO₂; 3,600 m³/h air.

// CORAL – sourcing CO₂ from air

In the future, hydrocarbons will still be needed for a renewable energy supply, especially in areas that cannot be fully electrified or where hydrogen cannot be used directly. These include fuels for air traffic, shipping, rail traffic and heavy goods transport, seasonal energy storage and chemical raw materials. In addition to hydrogen, hydrocarbon synthesis also requires carbon, which can be extracted renewably from biomass or from the air in the form of CO₂. Some of these processes require a considerable amount of energy. For this reason, CORAL focuses on developing and testing a process for extracting CO₂ from the air with the lowest possible energy consumption. Waste heat from associated process steps such as electrolysis and synthesis is to be utilised by way of process integration.

All known processes require blowing a relatively large volume of air through an absorber, compared to the amount of CO₂ obtained. The air collection and desorption processes are the highest contributors to the electrical power consumption. For demonstration purposes, the CORAL project uses a washing process with an aqueous amine solution instead, which also opens up the possibility of using waste heat for thermal CO₂ desorption from downstream process steps such as electrolysis and synthesis and thereby minimises electrical energy consumption. The figure above shows the desorbers and absorbers used, which are housed in a 20-ft container.

The method features an efficient, integrated overall process with the option of using waste heat from downstream process steps such as electrolysis and synthesis and is therefore predestined for regenerative provision of carbon in large-scale e-fuels production. Due to its chemical engineering characteristics, the method is, in addition to its low electrical energy requirement, particularly well suited for scaling up to large power classes. The project was funded by the German Federal Ministry of Education and Research within the framework of the CO₂Plus funding measure.



// Testbetrieb bei gleichzeitiger Ab- und Desorption.
// Test run with simultaneous absorption and desorption.



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

„We develop application-oriented technology modules related to P2X and support our industrial clients in their implementation.“

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

// Dr.-Ing. Ulrich Zuberbühler
E-mail: ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-239



// Die 10-kW_{th}-Wirbelschichtanlage des ZSW mit Heißgas-Partikelabtrennung.
 // The 10 kW_{th} fluidised bed facility at ZSW for sewage sludge incineration with high-temperature particle separation.

// Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Phosphor ist ein elementarer Baustein des Lebens, der nicht substituierbar ist – vergleichbar mit Wasser. Über biogene Reststoffe wie tierische Nebenprodukte und über Abfallstoffe wie Klärschlamm geht Phosphor verloren, da diese Stoffströme zunehmend verbrannt werden. Bisher ist die Phosphorrückgewinnung aus der Asche wirtschaftlich nicht darstellbar, sodass der umweltbelastende und energieintensive Abbau fossiler Rohphosphate immer stärker zunimmt, deren Vorkommen auf sehr wenige außereuropäische Länder begrenzt ist.

Zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung entwickelt das ZSW ein neues Verfahren zur Klärschlammverbrennung im Wirbelschichtprozess. Ziel ist es, die Eigenschaften der Asche für eine anschließende Nutzung zu optimieren. Im Fokus hierbei steht die Pflanzenverfügbarkeit der phosphorreichen Asche für deren Einsatz in der Landwirtschaft, um den Phosphorkreislauf zu schließen. Hierfür wurden unter realitätsnahen Bedingungen Klärschlämme unter Zugabe von kalziumhaltigen Additiven verbrannt. Dabei wurde mit Phosphor angereicherte Asche konstanter Produktqualität erzeugt, die sich durch einen hohen Phosphorgehalt von bis zu 10 Gewichtsprozent auszeichnete. Durch begleitende theoretische und experimentelle Untersuchungen im Rahmen der personenbezogenen EU-Förderung ReCaPhos werden günstige Verbrennungsbedingungen und Klärschlameigenschaften identifiziert und der Prozess grundlegend analysiert. Auf dieser Basis erfolgt die Übertragung in den Wirbelschichtprozess, wofür ein 10-kW-Laborwirbelschichtreaktor mit Hochtemperatur-Ascheabtrennung und umfangreicher Messtechnik zur Verfügung steht.

// Recovering phosphorus from sewage sludge

Phosphorus is an essential building block of life that cannot be substituted – comparable to water. Phosphorus is lost through biogenic residues such as animal by-products and waste materials such as sewage sludge, as these material flows are increasingly incinerated. To date, recovering phosphorus from ash is not economically feasible, so it is usually produced by mining fossil phosphate rock, which is found only outside Europe in very few countries whereby its mining is environmentally harmful and energy-intensive.

Together with partners from industry and research, ZSW is developing a new process for sewage sludge incineration in the fluidised bed process. The aim is to optimise the properties of the ashes for subsequent use. The focus here is on the plant availability of the phosphorus-rich ash for its use in agriculture in order to complete the phosphorus cycle. Sewage sludge was incinerated under realistic conditions along with calcium-containing additives. This process produced phosphorus-enriched ash with a consistent product quality, characterised by a high phosphorus content of up to 10 percent by weight. In the framework of the EU personal funding programme ReCaPhos, theoretical and experimental research accompanying the programme is identifying favourable incineration conditions and sewage sludge properties, and the process is being fundamentally analysed. This information will then be transferred to the fluidised bed process using a 10-kW laboratory fluidised bed reactor with a high-temperature ash separator and extensive measurement equipment which is available at ZSW.

// Begleitende Materialanalyse der Ascheprodukte.
 // ZSW researcher analysing the ash produced by incinerating sewage sludge.



// Kontrollierte Verbrennung von Klärschlamm im Zweizonen-Rohröfen.
 // Incineration of sewage sludge under defined conditions in a two-zone furnace.

// **Tonja Marquard-Möllenstedt**
 E-mail: tonja.marquard-moellenstedt@zsw-bw.de
 Phone: +49 711 7870-285



// Die Power-to-Gas-Anlage im Megawattmaßstab am Hoehrhein.
 // The power-to-gas plant on a megawatt scale located on the Upper Rhine.

// PtG-BW – Perspektive Reallabor

Mit dem Leuchtturmprojekt „Power-to-Gas Baden-Württemberg (PtG-BW)“ wurde im südbadischen Grenzach-Wyhlen eine Elektrolyse-Referenzanlage für Wasserstoff (H₂) geschaffen. Die Anlage bezieht per Direktleitung regenerativen Strom aus dem angrenzenden Wasserkraftwerk Wyhlen und hat eine Produktionskapazität von etwa 500 kg Wasserstoff pro Tag. Die angeschlossene Abfüllstation für H₂-Trailer hat eine Umschlagkapazität von 1.500 kg pro Tag. Im Anlagenkomplex ist zusätzlich eine Forschungsplattform des ZSW integriert, in dem optimierte Elektrolyseure im Leistungsbereich bis zu 500 kW unter Praxisbedingungen erprobt werden.

Ziele des Leuchtturmprojekts sind die Identifikation technologischer Potenziale sowie die praxisnahe Erprobung innovativer Komponenten und Verfahren. So wurde im Projekt gemeinsam mit Industrieunternehmen aus Baden-Württemberg eine Technologie-Roadmap erarbeitet und eine ZSW-eigene Elektrolysetechnologie erfolgreich in der Realumgebung getestet. Mit der Anlage konnte eine 20 % höhere Leistungsdichte als im industriellen Anlagenteil nachgewiesen werden. Der Elektrolyseur besteht außerdem aus einer geringeren Anzahl an Einzelteilen und ist besser für die Serienfertigung geeignet. An dem laufenden Projekt sind neben dem ZSW als Projektkoordinator drei weitere Forschungsinstitute und acht Industriepartner beteiligt. Das Vorhaben wird vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg gefördert.

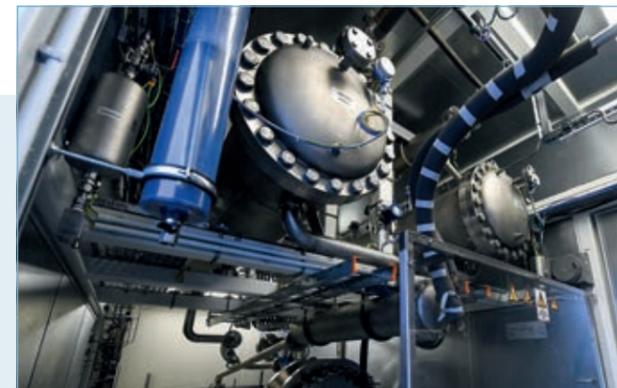
Der Power-to-Gas-Standort in Grenzach-Wyhlen ist einer der Gewinner des Ideenwettbewerbs „Reallabore der Energiewende“ des Bundeswirtschaftsministeriums. In einem Verbund mit acht Partnern wird die Anlage leistungsseitig erweitert und der regenerative Wasserstoff in den Sektoren Industrie und Mobilität genutzt. Die anfallenden Abwärmen sollen in ein Nahwärmenetz eingespeist werden.

// PtG-BW – new prospects for a real-life laboratory

An electrolysis reference plant for hydrogen (H₂) generation was constructed in Grenzach-Wyhlen in southern Baden as part of the flagship project Power-to-Gas Baden-Württemberg (PtG-BW). The plant draws regenerative electricity via a direct connection to the neighbouring Wyhlen hydroelectric power plant and has a production capacity of around 500 kg of hydrogen per day. The connected H₂ filling station has a handling capacity of 1,500 kg per day. The facility complex also contains a ZSW research platform in which optimised electrolyzers in the power range of up to 500 kW are tested under real operating conditions.

The objectives of the flagship project include the identification of technological potentials and the practical testing of innovative components and processes. Together with industry partners from Baden-Württemberg, a technology roadmap has been drawn up and ZSW's electrolysis equipment has been successfully tested in the real-world environment. With the facility, a 20% higher power density than in the industrial part of the plant was demonstrated. Moreover, the electrolyser consists of a smaller number of individual parts and is more suitable for mass production. In addition to ZSW as the project coordinator, three other research institutes and eight industry partners are involved in the ongoing project. The project is being funded by the State Ministry of Baden-Württemberg for Economic Affairs, Labour and Housing Construction.

The Power-to-Gas site in Grenzach-Wyhlen is one of the winners of the idea competition “Real-world laboratories of the energy transition” of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. In association with eight partners, the capacity of the facility will be expanded, and its regenerative hydrogen will be used in the industrial and mobility sectors. The generated waste heat is to be fed into a local heating network.



// F&E-Anlage für effizienz- und kostenoptimierte Elektrolyseblöcke bis 500 kW.
 // R&D facility for efficiency- and cost-optimised electrolysis blocks up to 500 kW.

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

// 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. Über 30 Jahre Materialforschung bilden die Basis für das umfangreiche Verständnis der Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien (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.

Ein weiterer Fokus liegt auf der Entwicklung von Batteriezellen im Format 18650, 21700 sowie Single-Layer- und gestapelte Pouchzellen. Hier stehen neue Fertigungsprozesse für leistungsfähigere Komponenten für zukünftige Lithium-Zellgenerationen im Zentrum. Die 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 Optimierung des Zelldesigns.

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 größte 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.

// 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.

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 specialises in post-mortem analyses. These are essential for understanding ageing processes and potential safety risks and for optimising cell design.

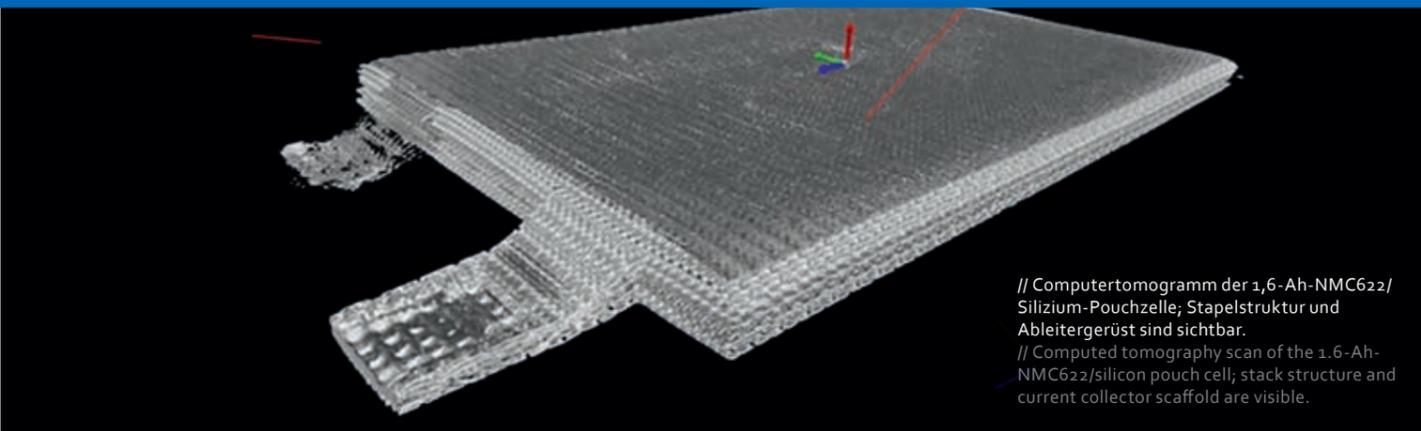
ZSW is a partner institution of the virtual centre for future energy storage CELEST (Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe). CELEST was founded together with KIT and Ulm University. It is the German research and development platform for future energy storage, where POLiS (Post Lithium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



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

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

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



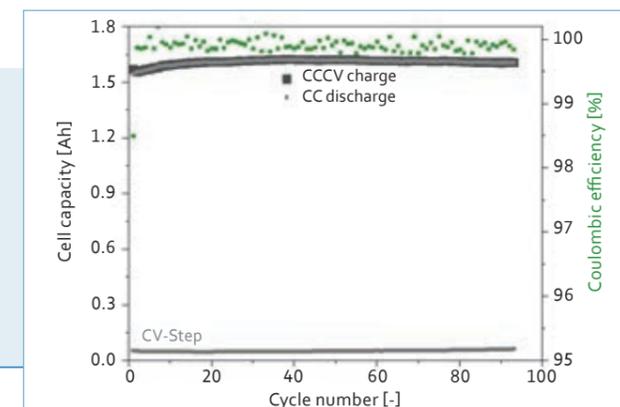
// Computertomogramm der 1,6-Ah-NMC622/Silicium-Pouchzelle; Stapelstruktur und Ableitergerüst sind sichtbar.
// Computed tomography scan of the 1.6-Ah-NMC622/silicon pouch cell; stack structure and current collector scaffold are visible.

// Stabile NMC/Silizium-Zellen dank durchlässiger Elektrodenstapel

Hohe Reichweite ist eine Kernanforderung an elektrisch betriebene Fahrzeuge. Sie wird maßgeblich durch die Energiedichte der Zelle bestimmt. Ein wirkungsvoller Hebel zur Steigerung der Energiedichte und damit der Speicherfähigkeit wird im Ersatz von Graphit durch Silizium auf der negativen Elektrode gesehen.

Silizium übertrifft in seinem theoretischen Speichervermögen Graphit um den Faktor 10. Zwei Herausforderungen erschweren jedoch einen direkten Einsatz: eine ausgeprägte periodische Volumenatmung im elektrochemischen Betrieb und hohe initiale Anfangsverluste, durch die die positive Wirkung des Siliziums in realen Zellen weit hinter den theoretischen Erwartungen zurückbleibt.

Im Rahmen des Projekts PRODUKT wurde ein innovatives Zellkonzept entwickelt, das für beide Herausforderungen wirksame Lösungsansätze liefern konnte. Das Konzept basiert auf dreidimensional strukturierten, durchlässigen Stromableitern: Die dreidimensionale Struktur des Stromableiters stabilisiert die einzelne Elektrode gegen mechanische Desintegration. Die Durchlässigkeit der einzelnen Stromableiter macht den gesamten Stapel für den Lithium-Ionen-Transport querdurchlässig. Dadurch ist es erstmalig möglich, Siliziumanoden im fertigen Zellstapel elektrochemisch zu präolithieren und so die irreversiblen initialen Verluste vollständig zu kompensieren. Im Gegensatz zu literaturbeschriebenen Verfahren der Präolithierung ist diese Methode technisch umsetzbar, kontrollierbar und sicher. Die Wirksamkeit dieses Ansatzes hat das ZSW in Pouchzellen (CT-Bild s. Abb. oben) erfolgreich nachgewiesen. Die Zelle enthält sechs Siliziumanoden und zeigt ein außergewöhnlich stabiles Zyklenverhalten (s. Abb. unten). Als Kathodenmaterial wurde NMC622 eingesetzt; die Anoden enthalten 60 % Silizium und wurden zu 15 % vorlithiiert. Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung über drei Jahre gefördert.



// Stable NMC/silicon cells through permeable electrode stacks

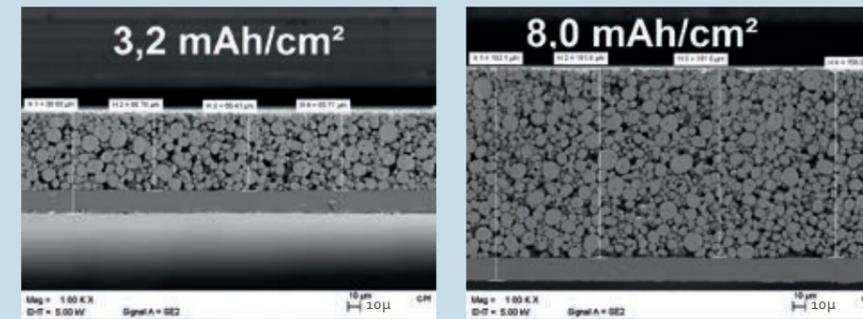
A long range is a key requirement for electrically powered vehicles. This is mainly determined by the energy density of the electrochemical storage unit. An effective way to increase the energy density of a lithium-ion battery at cell level is to replace graphite at the negative electrode with silicon.

Silicon exceeds graphite by a factor of 10 in terms of its theoretical storage capacity. Two challenges, however, limit the practical application of silicon so far: a pronounced periodic volume change during electrochemical operation and a high initial capacity loss. This makes the positive effects of silicon in real cells fall far short of theoretical expectations.

An innovative cell concept was developed as part of the PRODUKT project, offering effective solutions for both challenges. The concept is based on 3D-structured, permeable current collector systems: the three-dimensional structure of the current collector protects the individual electrode against mechanical disintegration. The permeability of the individual current collectors makes the entire stack transversely permeable to lithium-ion transport. So, for the first time, it is now possible to electrochemically prelithiate silicon anodes in the ready assembled cell stack and fully compensate for the irreversible initial losses. In contrast to the prelithiation methods published so far, this new concept is technically feasible, controllable and safe. The feasibility of ZSW's approach has been successfully demonstrated in pouch cells (CT image, see fig. above). The presented cell contains six silicon anodes and exhibits exceptionally stable cycle behaviour (see fig. below). NMC622 was used for the cathode; the anodes contain 60% silicon and were prelithiated to 15%. The project was funded by the German Federal Ministry of Education and Research for a period of three years.

// Zyklenverhalten und Daten der Pouchzelle mit NMC622 und Siliziumanoden.
// Cycle behaviour and pouch cell data with NMC622 and silicon anodes.

// Dr. Peter Axmann
E-mail: peter.axmann@zsw-bw.de
Phone: +49731 9530-404



// Elektrode mit herkömmlicher Flächenkapazität (links) und ultradicke Elektrode mit sehr hoher Flächenkapazität (rechts).
 // Electrode with conventional area capacity (left) and ultra-thick electrode with very high area capacity (right).

// Neue Methoden zur Charakterisierung von Energiespeichermaterialien

In dem dreieinhalbjährigen, von der Europäischen Union geförderten Vorhaben TEESMAT forscht das ZSW gemeinsam mit 20 Partnern aus 11 Ländern an neuen Methoden zur Charakterisierung von Energiespeichermaterialien für Lithium-Ionen-Batterien. Ziel des Vorhabens ist die Demonstration von insgesamt 30 neuen oder weiterentwickelten Methoden zu von den Industriepartnern vorgegebenen Anforderungen.

Am ZSW wird in TEESMAT an sieben Methoden zur Charakterisierung von Batteriematerialien gearbeitet. Darunter befinden sich operando-Methoden für direkte Einblicke während des Ladens und Entladens von Batteriezellen sowie Analysemethoden zur Materialcharakterisierung aus Post-mortem-Analysen. Ein Beispiel ist die Glimmentladungsspektroskopie (GD-OES, s. Abb. oben), die es erlaubt, Tiefenprofile der Elementarverteilung in Anoden zu bestimmen (s. Abb. unten). Die Tiefenprofile können innerhalb kurzer Zeit von der Anodenoberfläche bis zum Ableiter aufgenommen werden.

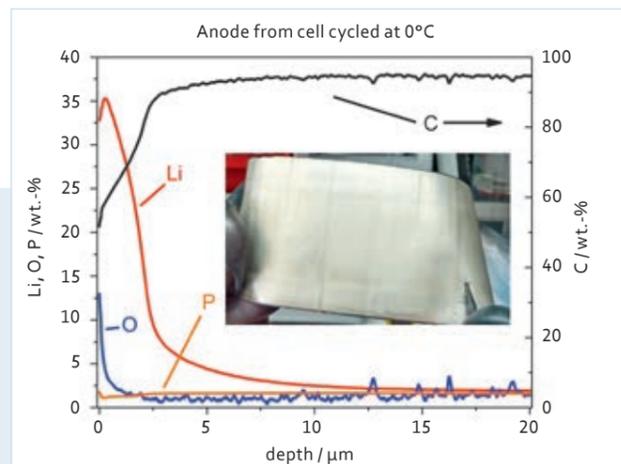
Die neuen Methoden haben alle gemeinsam, dass sie die Aufklärung von Alterungsmechanismen wie SEI-Wachstum, Lithium-Plating, Silikatbildung auf Hochenergie-Graphit-Silizium-Anoden ermöglichen. Damit können Degradationsmechanismen verstanden und Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer von Batteriezellen abgeleitet werden.

// New methods for characterising energy storage materials

Together with 20 partners from 11 countries, ZSW is researching new methods for characterising energy storage materials for lithium-ion batteries as part of the three-and-a-half-year TEESMAT project, which is funded by the European Union. The aim of the project is to demonstrate 30 new or further developed methods for solving problems specified by the industrial partners.

ZSW is working on seven methods for characterising battery materials as part of TEESMAT. These include operando methods for gaining direct insights during the charging and discharging of battery cells as well as analytical methods for characterising materials based on post-mortem analyses. One example is glow discharge optical emission spectroscopy (GD-OES, see fig. above), which can be used for determining elemental depth profile distributions in anodes (see fig. below). The depth profiles can be recorded within a short time from the anode surface to the contact.

A common feature of all the new methods is that they enable the clarification of ageing mechanisms such as SEI growth, lithium plating and silicate formation on high-energy graphite silicon anodes. This makes it possible to understand degradation mechanisms and derive measures to extend the life of battery cells.



// GD-OES-Tiefenprofil der Graphitanode aus einer kommerziellen 3,25-Ah-18650-Zelle.
 DOI: 10.1149/2.0961713jes
 // GD-OES depth profile of a graphite anode from a commercial 3.25 Ah 18650 cell.
 DOI: 10.1149/2.0961713jes

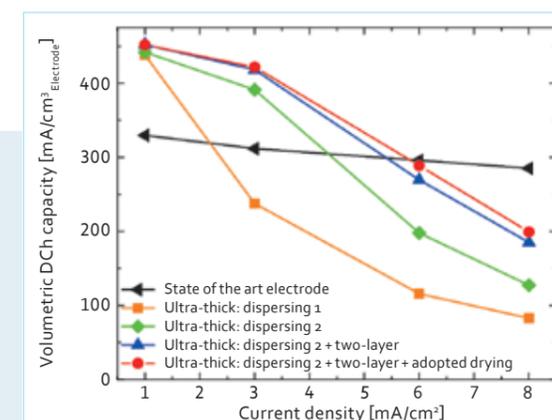
// Dr. Thomas Waldmann
 E-mail: thomas.waldmann@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-212

// Ultradicke Elektroden für Lithium-Ionen-Zellen mit hoher Energiedichte

Im Forschungsprojekt HighEnergy erforscht das ZSW, wie durch ultradicke Beschichtung von Kollektorfolien mit Aktivmaterialkompositen die Volumenkapazität und Energiedichte von Lithium-Ionen-Zellen deutlich gesteigert und die Herstellungskosten gesenkt werden können. Das Projekt ist auf die Erarbeitung innovativer Herstellungsprozesse und auf ein Upscaling zu einer großen und wirtschaftlichen Produktion von Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland ausgerichtet. Das Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Forschungsclusters ProZell gefördert.

Durch ultradicke Elektrodenschichten wird Passivmaterial eingespart und die Volumenausnutzung im Gehäuse gesteigert. Sehr dicke Elektroden weisen aber nach herkömmlichen Herstellungsprozessen eine geringe mechanische Qualität und eine starke Beeinträchtigung der Kinetik auf. Eine anwendungsrelevante Leistung ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für die Akzeptanz dieser Hochenergieelektroden.

Mit angepassten Herstellungsprozessen konnten die Passivkomponenten in sehr dicken Elektrodenkompositen deutlich gleichmäßiger verteilt werden, als das mit einem Prozess, der bei herkömmlichen Elektrodendicken zu guten Produktqualitäten führt, möglich ist. Durch die Kombination einer verbesserten Dispergierprozedur, eines mehrlagigen Auftrags von Suspensionen mit unterschiedlichen Rezepturen auf die Kollektorfolie sowie eines adaptierten Trocknungsprozesses, der ohne Verlängerung der Trocknungszeit auskommt, konnte die Nutzbarkeit der erhöhten Volumenkapazität ultradicker Elektroden zu einer Stromdichte von 8 mAh/cm² verdoppelt werden (s. Abb.).



// Abhängigkeit der Volumenkapazität ultradicker Kathoden in Halbzellen im Vergleich zu einer Kathode nach dem Stand der Technik. Parameter: Herstellungsprozess.
 // Dependence of the volume capacity of ultra-thick cathodes in half cells and a state-of-the-art cathode. Parameter: manufacturing process.

// Dr. Alice Hoffmann
 E-mail: alice.hoffmann@zsw-bw.de
 Phone: +49731 9530-558

// 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 ECP 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 (FPL) über eine wichtige Beratungskompetenz bezüglich Zellfertigung und Kostenbetrachtungen.

// 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 ECP 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 (FPL).



// Die seriennahe Produktionstechnologie für PHEV-1-Zellen mit gewickelten Elektroden wird um die Stapeltechnik erweitert.
// The close-to-production technology for PHEV-1 cells with wound electrode designs is being expanded to electrode stacking.

// Lithium-Ionen-Zellen: Elektroden stapeln statt wickeln

Die Leistung einer Batterie wird signifikant durch ihre Elektrodenanordnung beeinflusst. Neben Wickelkonfigurationen der prismatischen Hardcase-Zellen (PHEV-1-Format) rücken Blattstapel immer mehr in den Fokus. Grundsätzlich werden durch den Einsatz von Einzelblatt-Elektroden Knick-, Falt- und Wickelschritte vermieden, was radienabhängige Nachteile hinsichtlich der Materialermüdung eliminiert. Systeme mit Stapelkonfiguration zeigen eine sehr homogene Wärme- und Stromdichteverteilung, da lokal variierende Anpressdrücke minimiert sind. Somit können Leistung, Lebensdauer und Sicherheit einer Batterie gesteigert werden.

Allerdings ist die effiziente Automatisierung der benötigten Pick-and-place-Prozesse eine Herausforderung. Die Einzelblätter müssen präzise und deckungsgleich abgelegt werden. Insbesondere das Anheben der oberflächensensitiven und biegeschlaffen Einzelblätter verursacht immense mechanische Belastungen, die zu Deformationen und Beschädigungen führen können. Kapazitätseinbrüche, Lebensdauerverkürzung und eine Reduzierung der Zellsicherheit sind die Folge. Die einzelnen aufeinander folgenden Pick-and-place-Prozesse mit einem hohen Anspruch an Präzision sind vergleichsweise zeitintensiv. Aktuelle Handhabungslösungen erfordern ein komplexes Überprüfungs- und Ausrichtungsverfahren, um eine genaue Positionierung der Elektroden sicherzustellen. Verfügbare Anlagen für sehr schnelle Stapelprozesse genügen eher Laboranforderungen als denen einer Massenfertigung.

Hier setzt das ZSW an und fokussiert zusammen mit Industriepartnern in dem vom Bundesforschungsministerium geförderten Projekt STACK auf die Entwicklung eines ultraschnellen Stackers, mit dem hochpräzises Stapeln von Elektroden verwirklicht werden kann.

// Lithium-ion cells: stacking electrodes instead of winding them

The performance of a battery is significantly determined by the arrangement of its electrodes. In addition to wound configurations in prismatic hardcase cells (PHEV-1), stacks are increasingly gaining in importance. In principle, the use of single sheet electrodes avoids bending, folding and winding steps, which eliminates radius-dependent disadvantages related to material fatigue. Systems with a stack configuration exhibit a highly homogeneous heat and current density distribution, since local variations of the contact pressure are minimised throughout. This increases the performance, service life and safety of a battery.

However, an efficient automation of the required pick-and-place processes remains challenging. Individual sheets must be placed precisely and congruently. Lifting surface-sensitive and pliable single sheets in particular causes considerable mechanical stress, which can lead to deformation and damage. Capacity loss, shortened service life and a deterioration of cell safety are the result. The individual, successive pick-and-place processes with a high demand for precision are relatively time-consuming. Current handling solutions necessitate a complex inspection and alignment process to ensure accurate positioning of the electrodes. Currently available systems for very fast stacking processes tend to meet laboratory requirements but not those of mass production.

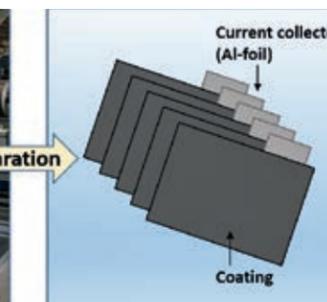
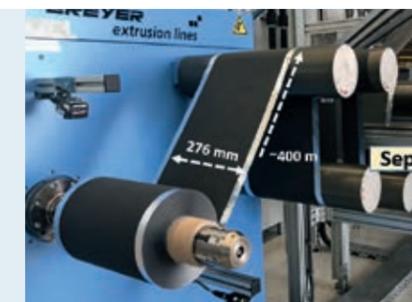
This is where the ZSW steps in and, together with industry partners, focusses on developing an ultra-fast stacker capable of stacking electrodes with a high level of precision as part of the STACK project funded by the Federal Ministry of Education and Research.



„Am ZSW können innovative, industrietaugliche Batteriezellen (25+ Ah) bis zur Serienreife vorentwickelt und damit der Transfer in die industrielle Massenproduktion beschleunigt werden.“

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

“At ZSW, innovative battery cells (25+ Ah) suitable for industrial use can be pre-developed to series maturity, accelerating their transfer to industrial mass production.”



// Die hauchdünnen, hunderte Meter langen Elektrodenbänder (links) müssen vereinzelt und mit den filigranen Separatorblättern deckungsgleich, maschinell und effizient abgelegt werden.
// The extremely thin electrode strips (left), hundreds of metres in length, must be separated and stacked congruently, mechanically and efficiently with the filigree separator sheets.

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

// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECA 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 sowie in portablen Geräten oder in elektrifizierten Antriebssträngen von Fahrzeugen – ob zu Land, zu Wasser oder für die Luftfahrt.

Im elektrischen Batterietest werden Zellen, Module und Systeme auf Funktionalität geprüft, deren 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.

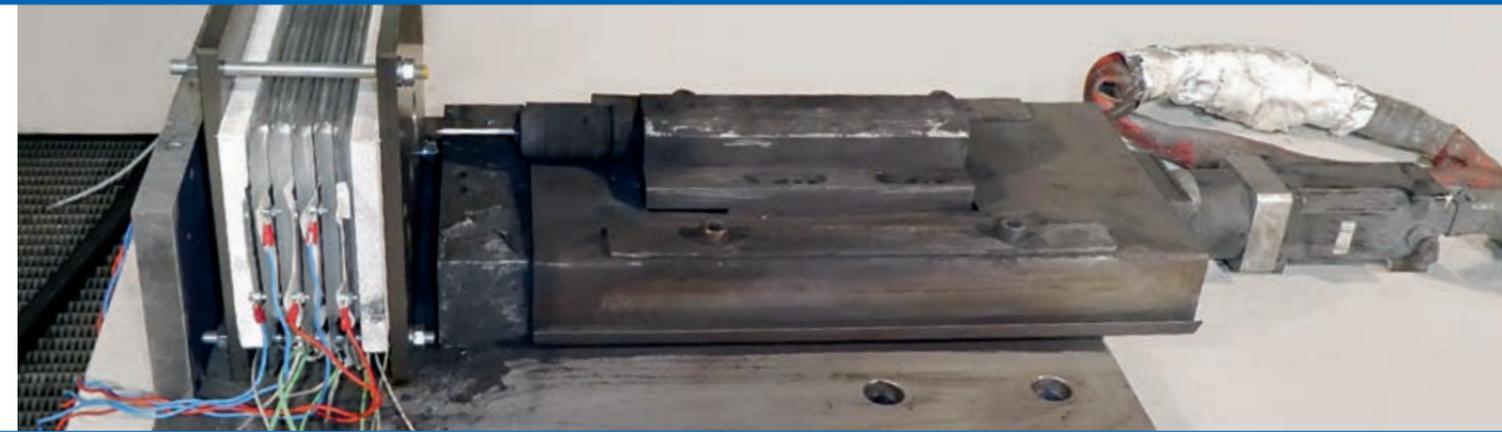
Herzstück der Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Modellierung und Simulation von Zellen und Batteriesystemen, das Batteriemangement sowie die Batteriezustandsbestimmung. Erforscht werden modellbasierte Algorithmen zur Zustandsbestimmung (Ladezustand und Alterung), zur Vorhersage 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.

// Our main focus

The ECA 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 focusses on characterising them under various operating conditions and investigating their behaviour with operating errors and in accident situations. The batteries' areas of application 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 and measure their performance as well as determining their expected service life under defined loads and environmental conditions. Boundary loads or destructive tests are used to assess the batteries' reactions and potential dangers posed by them 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 errors in the system and extinguishing or controlling fires.

The centrepiece of 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.



// 551p-Zellstack vorbereitet für den Propagationstest, Anregung per Nagel-Penetration.
// 551p cell stack prepared for the propagation test, initiated by nail penetration.

// Propagationsuntersuchungen an Li-Ionen-Zellen mit Barrierematerialien

Lithium-Ionen-Batterien für große Reichweiten von Elektrofahrzeugen gehen einher mit einer größeren Packungsdichte der Zellen. Im Batteriemodul können äußere Einflüsse oder ein Fehler in einer einzelnen Zelle zum thermischen Durchgehen (engl. thermal run-away) führen. Dabei wird die Zelle durch interne exotherme Reaktionen zerstört und große Energiemengen freigesetzt. Im Speicher kann dies zu Kettenreaktionen (Propagation) führen, die das gesamte Batteriepack betreffen – i. d. R. werden extrem große Energiemengen mit Brand freigesetzt. In einem Projekt mit dem Joint Research Centre, Directorate for Energy, Transport and Climate der Europäischen Kommission wird experimentell untersucht, wie Test-Prozeduren für die Bewertung der Propagationseigenschaften von Batterien zu gestalten sind. Die Ergebnisse sollen später in die Gesetzgebung zur Ausführung von Batterietests und Qualifizierungen einfließen.

Untersucht wurden Anregungsmethoden, um den thermal runaway von Lithium-Ionen-Zellen verschiedener Bauarten reproduzierbar zu erzeugen. Dabei erwies sich die Anregung durch Mikroheizkörper oder Nagelpenetration (s. Abb. o.) als geeignet. Die Anregung durch induktiven Wärmeeintrag (berührungsloses Verfahren) erwies sich als interessant, bedarf aber noch einiger Entwicklungsschritte. Folgend ging es um die Anwendbarkeit der Anregungsmethoden für Batteriemodultests, Fehlerfortpflanzung, Emissionsanalysen und zur Quantifizierung. Untersucht wurden 551p- sowie 1052p-Module aus einer Ersatzbatterie eines originalen Elektrofahrzeuges (s. Abb. u.). Die Zelle ist eine LiC-NMC-Zelle mit einer Kapazität von 40 Ah und einer Energiedichte von ca. 180 Wh/kg. Die Untersuchungen erfolgten zur Stabilität und Reproduzierbarkeit der Tests, zur Beurteilung der Streuung der Ergebnisse unter gleichen Versuchsrandbedingungen, zum Einfluss von thermischen Barrieren zwischen den Zellen sowie zur Verzögerung bzw. Verhinderung der Propagation.

// Propagation studies on lithium-ion cells with barrier materials

Lithium-ion batteries for long-range electric vehicles entail a higher cell packing density. External influences or faults in individual cells in the battery module can lead to a thermal runaway. When this happens the cell is destroyed by internal exothermic reactions, and large amounts of energy are released. This can lead to chain reactions (propagation) in the storage system that affect the entire battery pack – usually extremely large amounts of energy are released and the system catches fire. As part of a project with the Joint Research Centre, Directorate for Energy, Transport and Climate of the European Commission, experimental studies are being carried out to determine how test procedures can be designed to evaluate the propagation properties of batteries. The results will later be incorporated into legislation on battery testing and qualification.

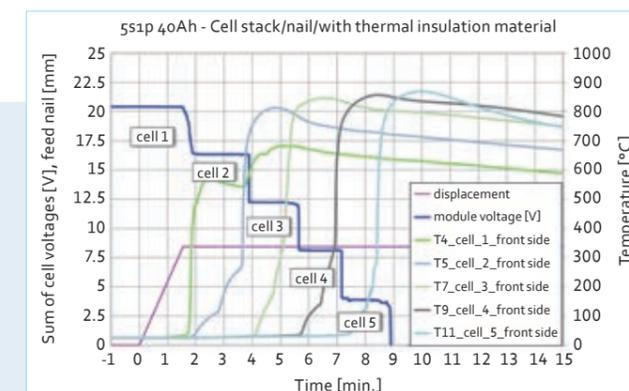
Excitation methods have been investigated to reproduce the thermal runaway in lithium-ion cells of different types. Stimulation by micro-heating elements or by nail penetration (see fig. above) proved to be suitable. The inductive heat input method (contactless) proved promising but still requires some further development. Further research involved the applicability of the excitation methods for battery module tests, error propagation, emission analysis and quantification. 551p and 1052p modules from a replacement battery of an original electric vehicle were examined (see fig. below). The cell is a LiC-NMC cell with a capacity of 40Ah and an energy density of about 180Wh/kg. Investigations were carried out to determine the stability and repeatability of the tests, to assess the variability of the results under the same test conditions, the effect of thermal barriers between the cells and the delay or prevention of propagation.



„Im ZSW-Labor für Batterietechnologie (eLaB) erforschen, testen und untersuchen wir Batterien und Systeme flexibel, normgerecht und innovativ.“

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

“At the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB), we investigate, test and research batteries and systems following a flexible, standard-compliant and innovative approach.”



// Verlauf der summierten Zellspannungen und der Zelltemperaturen während der Fehlerpropagation im 551p-40Ah-Zellstack mit thermischen Barrieren.
// Graph of the summed cell voltages and cell temperatures during error propagation in the 551p 40Ah cell stack with thermal barriers.

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



// Neuer Prüfstand für Fahrzeugbatterien (360 kW)

Die zunehmende Elektromobilität bringt einen erhöhten Bedarf an adäquaten Testmöglichkeiten für große Batterien (> 100 kW) mit sich, für die die Infrastruktur im Testzentrum des ZSW Labors für Batterietechnologie (eLaB) erweitert werden musste. Mit Unterstützung des Landes Baden-Württemberg konnte ein Batterieprüfstand für Elektrofahrzeugbatterien realisiert werden. Entstanden ist ein 360-kW-Prüfplatz mit einer Leistung von $2 \times 180 \text{ kW} = 360 \text{ kW}$ und einer Spannung von 1.000 V Strom: $2 \times 600 \text{ A} = 1.200 \text{ A}$. Die Temperatorkammer (s. Abb. oben) misst $3,5 \times 2,5 \times 1,5 \text{ m}$ (BxTxH) und verfügt über einen Temperaturbereich von -55 °C bis 140 °C , die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit liegt bei 4 °K/min .

Da im Batterietestbereich des ZSW vor allem prototypische Lithium-Ionen-Batterien getestet werden, bei denen u. a. die technische Umsetzung der Sicherheitsfunktionen noch zu prüfen ist, kann ein gewisses, wenn auch sehr kleines Restrisiko bei diesen Batterieprototypen unterstellt werden. Im Rahmen dieser Sondermittel wurde auch ein Außenbatterielager (s. Abb. unten) realisiert, durch das die Gesamtsicherheit im eLaB verbessert werden konnte, da keine Zellen im Gebäude deponiert werden müssen. Das Lager sichert einen Temperaturbereich von 5 °C bis 35 °C ab und ist für Batterien bis zu einem Gesamtenergieinhalt von 1 MWh ausgelegt. Es ist an das Brandmeldesystem des eLaB angeschlossen und baulich vom Gebäude getrennt. Das Gebäude misst $10,2 \times 5,8 \times 4,2 \text{ m}$, ist über ein Rolltor zugänglich und mit Staplern befahrbar.

// New test rig for vehicle batteries (360 kW)

The rise of e-mobility has led to an increased demand for adequate test facilities for large batteries (> 100 kW), so we had to expand the infrastructure at the test centre of the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB). A battery test rig for electric vehicle batteries was built with the support of the state of Baden-Württemberg. It accommodates up to 360 kilowatts of testing capacity (power: $2 \times 180 \text{ kW} = 360 \text{ kW}$, voltage: $1,000 \text{ V}$, current: $2 \times 600 \text{ A} = 1,200 \text{ A}$) with a $3,5 \times 2,5 \times 1,5 \text{ m}$ (WxDxH) temperature chamber for the range of -55 °C to 140 °C , and a temperature ramp rate of 4 °K/min (see fig. above).

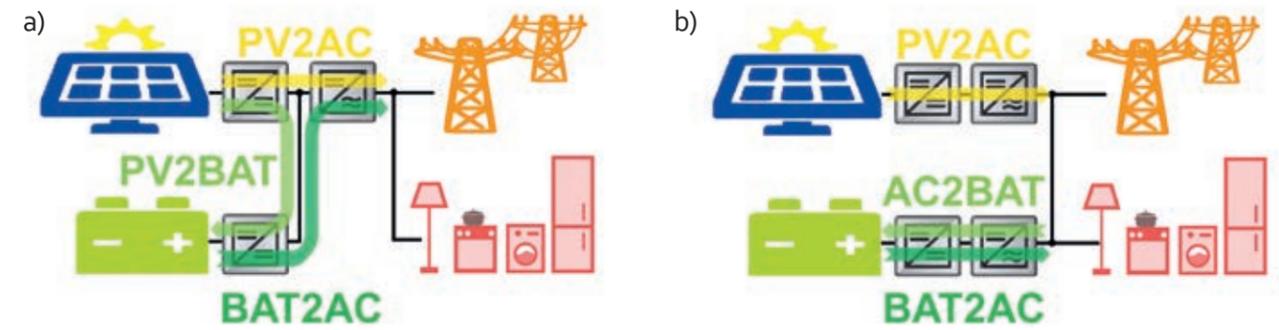
Since the battery test area at ZSW is mainly used to test prototype lithium-ion batteries of which the technical implementation of safety functions has yet to be tested a certain, albeit very small, residual risk can be assumed for these battery prototypes. With a part of these special funds, an external battery storage facility (see fig. below) was also built in order to improve the overall safety of the eLaB, as no cells have to be stored inside the building. The storage facility ensures a temperature range of 5 °C to 35 °C and is designed for batteries with a total energy content of up to 1 MWh . It is connected to the fire alarm system of the eLaB and is structurally separated from the building. The building measures $10,2 \times 5,8 \times 4,2 \text{ m}$ and is accessible via a roll-up door and can be accessed by forklifts.



// Neues Batterieaußenlager zur Lagerung von Batterien vor Tests und von Rückstellmustern.
// New external battery storage for batteries pending tests and for retained samples.

// Harald Brazel
E-mail: harald.brazel@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-503

// Schematische Darstellung der Energieflüsse eines a) DC-gekoppelten und b) AC-gekoppelten Systems.
// Schematic representation of the energy flows of a) DC-connected and b) AC-connected systems.



// Performance von Solar-Heimspeichern

Mit der wachsenden Verbreitung von Solar-Heimspeichern gewinnen auch Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und Performance zunehmend an Bedeutung. Die Performance der Systeme ist dabei durch die Energieumwandelungspfade, Systemalterung, Standby-Verbrauch und Regelungseffizienz bestimmt.

Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Verbundprojekts „Sicherheit und Netzdienlichkeit von elektrischen Heimspeichersystemen mit Lithium-Ionen-Batterien“ wurden Methoden entwickelt und in entsprechende Testumgebungen zur Ermittlung der Performance von Solar-Speichersystemen in das ZSW-Testfeld implementiert und umgesetzt. Der Wirkungsgrad der Energieumwandelungspfade beschreibt auftretende Verluste der Leistungsumwandlungssysteme (z. B. Wechselrichter, Gleichspannungswandler etc.) und ist ein wichtiger Performance-Indikator. Je nach Systemtopologie gibt es verschiedene Energieumwandelungspfade, z. B. AC2BAT (Energie vom Stromnetz in die Batterie), BAT2AC (Batterieenergie ins Stromnetz) etc. (s. Abb. oben).

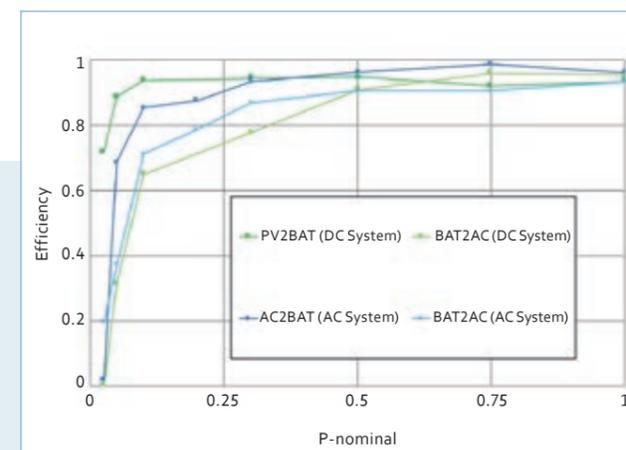
Der Wirkungsgrad der Energieumwandelungspfade in Abhängigkeit von der Leistung ist in der Abbildung unten dargestellt. Ein anderer wichtiger Performance-Indikator eines Heimspeichersystems ist dessen nutzbare Kapazität. Sie entspricht der tatsächlich verfügbaren Batterieenergie und ist aufgrund von Umwandlungsverlusten und Sicherheitsgrenzen niedriger als die nominale Speicherenergie.

// Performance of solar home storage systems

With the rising popularity of solar home storage systems, studies on reliability and performance are also becoming increasingly important. The performance of these systems is determined by the energy conversion pathways, system ageing, standby consumption and control efficiency.

Methods have been developed, and the relevant test environments for determining the performance of solar storage systems have been implemented and realised at ZSW's testing facility as part of a joint project funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy entitled "Sicherheit und Netzdienlichkeit von elektrischen Heimspeichersystemen mit Lithium-Ionen-Batterien" (Safety and Grid-compatibility of Electric Home Storage Systems with Lithium-ion Batteries). The efficiency of the energy conversion pathways describes losses occurring in the power conversion systems (e.g. inverters, DC-DC converters and so on) and is an important indicator of performance. Depending on the system topology, there are different energy conversion pathways, e.g. AC2BAT (energy from the power grid to the battery), BAT2AC (battery energy to the power grid), and others (see fig. above).

The efficiency of the energy conversion pathway as a function of power is shown in the figure below. Another important performance indicator of a home storage system is its usable capacity. It corresponds to the actually available battery energy and is lower than the nominal storage energy due to conversion losses and safety limits.

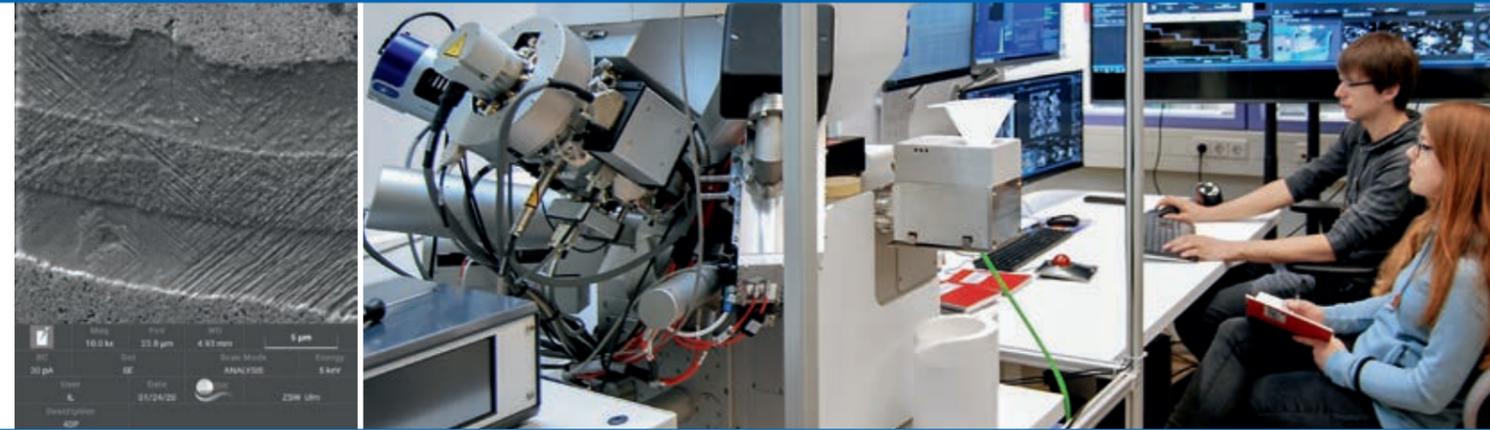


// Wirkungsgrad der Energieumwandelungspfade eines DC- und AC-gekoppelten PV-Speichersystems.
// Efficiency of the energy conversion pathways of a DC- and AC-connected PV storage system.

// 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 Elektrolyten. Ziele dieser Arbeiten sind, die Leistungsdichte und Lebensdauer zu steigern sowie 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 (z. B. Abb. oben rechts) und Analysen der Polymerverteilung in den Elektroden der Membran-Elektroden-Anordnung (MEA). Für die alkalische Wasserelektrolyse, für Hochleistungsspeicher mit wässrig-alkalischem Elektrolyten und zur Herstellung bifunktionaler Sauerstoffelektroden konnten Untersuchungen mit verschiedenen Arten nanostrukturierter Nickelmaterialien durchgeführt werden, die bereits hohe Aktivitäten und Zyklenfestigkeiten aufweisen. Besonders bedeutsam ist die Entwicklung einer im stark alkalischen Elektrolyten zyklenfesten 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 for PEMFC, the department optimises both the composition and microstructure of the catalyst layers. Its expertise includes microstructural analyses (e.g. fig. above right) and analyses of the polymer distribution in the electrodes of the membrane electrode array (MEA). 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.

// Einfluss des Katalysatorträgers auf die MEA-Leistungscharakteristik

Die Leistungscharakteristik von Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen (PEMFC) ist wesentlich von der Gestaltung der Sauerstoffelektrode abhängig. Von besonderem Interesse ist hierbei das Verhalten bei hoher Stromdichte, die neben der Katalysatoraktivität wesentlich durch den Stofftransport in der Luftelektrode bestimmt wird.

Zur Untersuchung des Einflusses des Katalysatorträgers wurden Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) mit Pt-Katalysatoren auf drei verschiedenen Katalysatorträgern hergestellt und in ihrer Leistungscharakteristik verglichen. Hierbei handelte es sich um zwei kommerziell verfügbare Katalysatoren, TKE (Hersteller Tanaka, geträgert auf Ruß mit 800 m²/g) und TKV (Hersteller Tanaka, geträgert auf Ruß Vulcan XC72 mit 250 m²/g), sowie Pt/C65 (Hersteller ZSW, auf graphitisiertem Ruß mit 62 m²/g). Der Pt-Gehalt aller drei Katalysatoren betrug 30 Gew.-%. Die mittlere Pt-Partikelgröße der kommerziellen Katalysatoren TKE und TKV lag bei 2 nm, die des selbst hergestellten Katalysators (C65) bei 4 nm. Man erkennt deutlich, dass die mit Katalysator auf hochoberflächigem Träger hergestellte MEA bei geringen Stromdichten die höchste Zellspannung aufweist, bei hohen Stromdichten jedoch in Transportbegrenzungen kommt. Elektroden mit Katalysatoren auf Trägern mit niedrigerer Oberfläche zeigen einen höheren Spannungsverlauf bei hohen Stromdichten und weisen daher Vorteile bei Hochleistungsanwendungen auf. Das kann auf verbesserte Gastransporteigenschaften in der Katalysatorschicht zurückgeführt werden.

// Neues Elektronenmikroskop mit Massenspektrometriedetektor (FIB-SEM).
// New electron microscope with mass spectrometry detector (FIB-SEM).

// Impact of the catalyst substrate on MEA performance characteristics

The performance characteristics of polymer electrolyte fuel cells (PEMFC) largely depend on the oxygen electrode's design. The high current density behaviour is particularly important and is largely determined by material transport in the air electrode and catalyst activity.

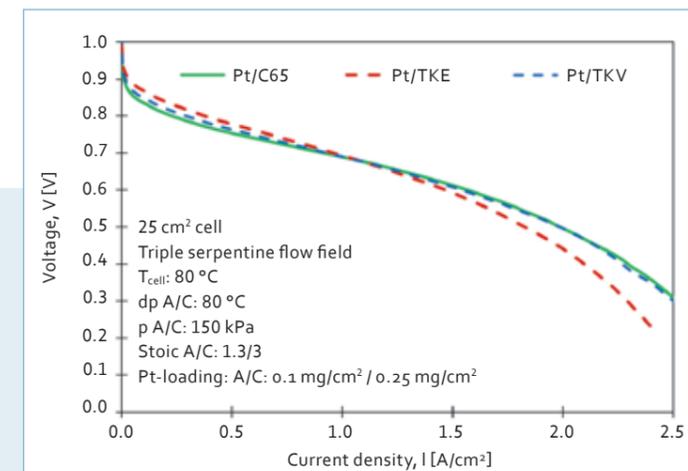
Membrane electrode assemblies (MEAs) with Pt catalysts were produced on three different catalyst supports and their performance characteristics were compared in order to assess the impact of the catalyst support. We studied two commercially available catalysts TKE (manufactured by Tanaka, supported on carbon black with 800 m²/g) and TKV (manufactured by Tanaka, supported on Vulcan XC72 carbon black with 250 m²/g) as well as Pt/C65 (manufactured by ZSW on graphitised carbon black with 62 m²/g). The Pt content of all three catalysts was 30 wt%. The mean Pt particle size of the commercial catalysts TKE and TKV was 2 nm, while that of the self-produced catalyst (C65) was 4 nm. It can clearly be seen that MEA produced with a catalyst on a high-surface support has the highest cell voltage at low current densities but faces transport limitations at high current densities. Electrodes with catalysts on lower surface supports exhibit a higher voltage curve at high current densities and therefore have an advantage in high-performance applications. This may be attributed to improved gas transport properties in the catalyst layer.



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

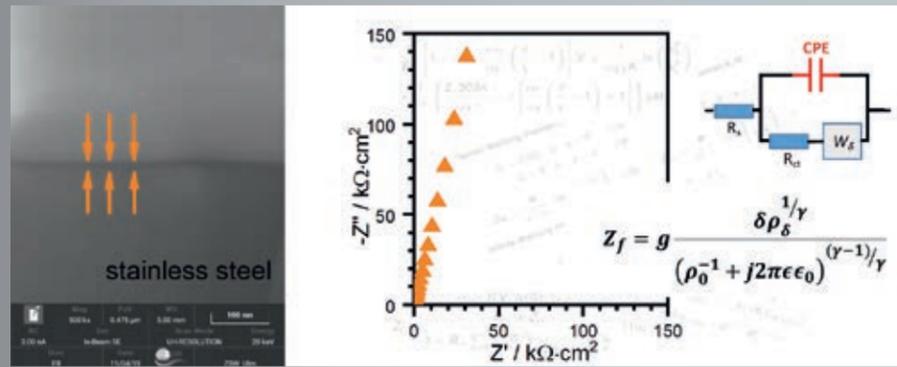
// Dr. Ludwig Jörissen, Head of Department
E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-605

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



// Strom-Spannungs-Kurven von MEAs, die mit Pt-Katalysatoren mit 30 % Edelmetallgehalt auf Kohlenstoffträgern mit verschiedenen Oberflächen hergestellt wurden.
// Current-voltage curves of MEAs made using Pt catalysts with 30% precious metal content on carbon supports with various surfaces.

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



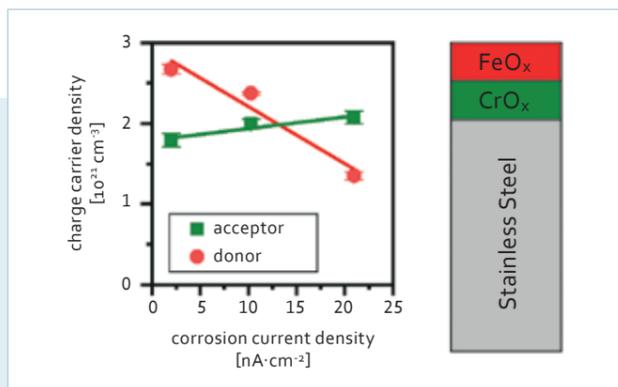
// V. l. n. r.: FIB-SEM-Aufnahme der passiven Schicht (s. Pfeile, ca. 5 nm), EIS-Daten, analoges elektrisches Ersatzschaltbild und formelmäßige Darstellung des Impedanzverhaltens.
 // f.l.t.r.: FIB-SEM image of the passive layer (see arrows, ca. 5nm), EIS data, analog equivalent electrical circuit and corresponding impedance equation.

// Physikalisch-chemische Eigenschaften von Passivschichten auf Edelstahl

Aus dünnen, geprägten Edelstahlfolien hergestellte Bipolarplatten sind heute Stand der Technik bei Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC), die für den Fahrzeugantrieb eingesetzt werden. Die Struktur sowie die chemischen Eigenschaften der dünnen Oxidfilme, die sich auf der Edelstahloberfläche ausbilden, bestimmen eine Vielzahl an Materialeigenschaften wie elektrische Widerstände, Korrosionsneigung und Haftvermögen für Beschichtungen.

Zur Bestimmung der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Passivschicht wurden neue Methoden zur Analyse PEMFC-relevanter Bedingungen aufgenommen und elektrochemische Impedanzspektren (EIS) eingesetzt. Die Auswahl des geeignetsten Ersatzschaltbilds erfolgte auf Basis des Informationskriteriums nach Akaike (s. Abb. oben). Die Leitfähigkeit der Oxidschicht wurde über eine Potenzreihe modelliert, wodurch eine quantitative Bestimmung der Passivschichtdicke von 4 nm auf der Stahlsorte 316L ermittelt werden konnte. Diese Methode stimmt optimal mit bildgebenden Verfahren überein, ist weniger aufwendig und dabei kostengünstiger. Ferner konnte der Auf- und Abbau der Passivschichtdicke in Abhängigkeit des Elektrodenpotenzials bestimmt werden.

Die Halbleitereigenschaften der Passivschicht konnten mittels Mott-Schottky-Plots analysiert werden. Sie entsprechen einem pn-Übergang. In Kombination mit einem Tiefenprofil der Schichtzusammensetzung wurde ein Strukturmodell der Passivschicht erstellt, in dem eine defektreiche Chromoxidschicht mit einer defektreichen Eisenoxidschicht bedeckt ist (s. Abb. unten). Die so bestimmten Halbleitereigenschaften wie Ladungsträgerdichte und Lage des Flachbandpotenzials können nun mit den bei den PEMFC-relevanten Potenzialen gemessenen Korrosionsraten korreliert werden.



// Physical and chemical characteristics of passive layer on stainless steel

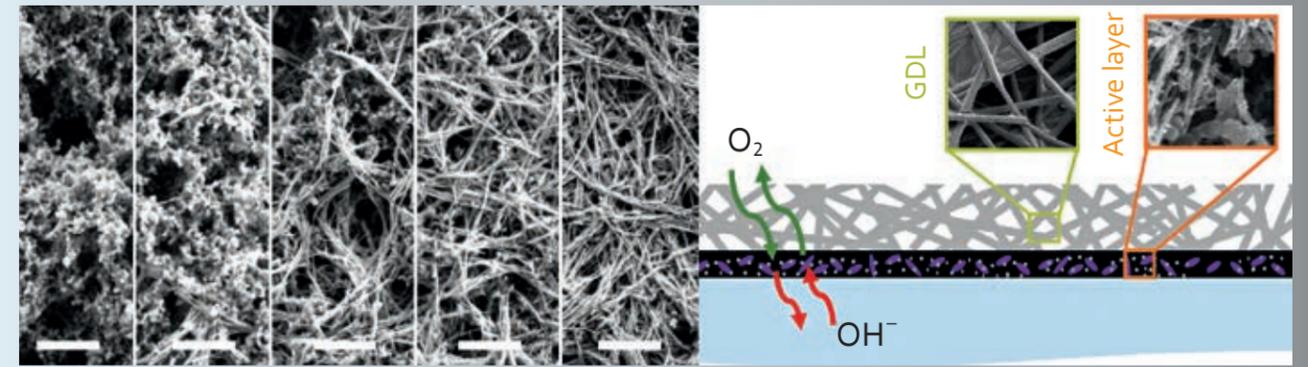
Thin stainless steel metal sheets are the most auspicious choice as bipolar plate materials in proton-exchange membrane fuel cells (PEMFCs) for automotive applications. The structural and chemical characteristics of the thin oxide film covering the stainless steel (the passive layer) govern many of the material properties such as resistance against corrosion, in-plane and through-plane electrical conductivity and adhesion of protective coatings.

At ZSW, we implement state-of-the-art (and beyond) analytical methods to probe the physical-chemical characteristics of the stainless steel passive layer by means of electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Advanced error-based statistical analyses, associated with the Akaike information criterion, allow for a down-selection of an equivalent analog electrical circuit for best fitting of the EIS experimental data acquired in experimental conditions relevant for PEMFCs. Application of the Power law model, modelling the decay of conductivity through the oxide layer, allowed for a quantitative determination of the passive layer thickness on 316L stainless steel (ca. 4 nm, in good agreement with direct imaging), and of its changes under electrochemical conditions.

Mott-Schottky plots revealed the semi-conducting characteristics of the passive layer, which are similar to a p-n heterojunction. In combination with depth-profile chemical analysis of the passive layer, we defined a structural model for the passive layer with an oxygen defective iron oxide layer on top of a chromium defective oxide layer. Quantitative determination of the charge carrier densities and of the flat band potentials are subsequently related to corrosion rates measured at potentials relevant for PEMFC applications.

// Ladungsträgerdichten und Korrosionsstromdichten für die Passivschicht aus Edelstahl 316L in Verbindung mit einer wässrigen Lösung mit 100 ppm Chlorid.
 // Charge carrier densities and corrosion current densities for the passive layer of 316L stainless steel in contact with aqueous solution containing 100 ppm chloride.

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



// REM-Aufnahmen einer Reihe kohlenstoffgetragener Katalysatormaterialien (links) und schematische Abbildung einer bifunktionalen Gasdiffusionselektrode aufgeteilt in Katalysatorschicht und Gasdiffusionsschicht (GDL) (rechts).
 // Set of SEM images for a series of carbon-supported catalyst materials (left) and schematic representation of a bifunctional gas diffusion electrode for O₂ electrocatalysis including a gas diffusion layer (GDL) and a catalytic active layer (right).

// Bifunktionale O₂-Elektroden für Metall-Luft-Batterien mit wässrigem Elektrolyten

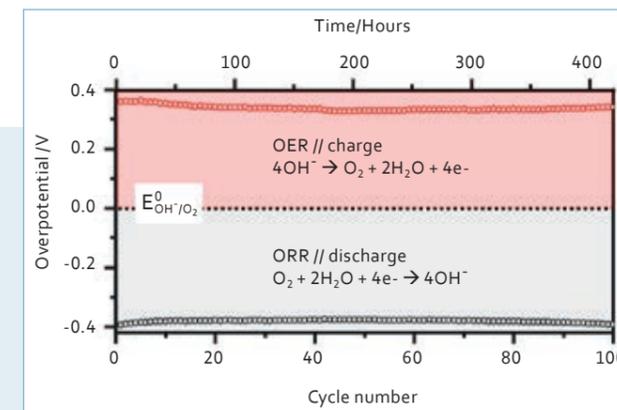
Wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien mit wässrigem Elektrolyten sind kostengünstige Systeme zur stationären Speicherung von Strom aus fluktuierenden, erneuerbaren Energien. Eine Kernherausforderung ist die Entwicklung von Sauerstoffelektroden (O₂) aus reichlich vorhandenen, kostengünstigen Materialien, mit niedriger Überspannung bezüglich Sauerstoffentwicklung und Sauerstoffverzehr. Die Elektroden weisen außerdem eine hohe Zyklenfestigkeit über viele Lade- und Entladezyklen auf.

Hierzu wurde auf Basis bekannter Grundlagen zur Sauerstoff-Elektrokatalyse eine Kompositelektrode bestehend aus Kohlenstoff, Nickel und Mangandioxid entwickelt. Zunächst wurden die Katalyse der Sauerstoffentwicklung (OER) und des Sauerstoffverzehrs (ORR) sowie die elektrochemisch aktiven Oberflächen optimiert und die Stabilität der Materialien durch elektrochemische Stresstests nachgewiesen (s. Abb. oben). Nachfolgend wurden die vielversprechendsten Katalysatorkombinationen mit einer geeigneten Gasdiffusionsschicht kombiniert und die Benetzungseigenschaften der so hergestellten Gasdiffusionselektrode (GDE) optimiert, sodass die bifunktionale Elektrode für beide Reaktionen (ORR und OER) bei einer anwendungsrelevanten Stromdichte von 10 mA·cm⁻² (j·Entladezeit > 12 mA·h) eine Überspannung von nur 0,35 V aufweist. Die Elektrode konnte über mehr als 400 Stunden stabil betrieben werden (s. Abb. unten). Nachfolgend sind Tests in Zn-Luft-Vollzellen geplant.

// Bifunctional O₂ electrodes for metal-air batteries with aqueous electrolyte

Rechargeable aqueous alkaline zinc-air batteries are promising electrochemical systems for the stationary storage of electricity produced by intermittent renewables. One of the key issues relates to the development of true bifunctional O₂ electrodes that are made of abundant materials, incur low costs and deliver high performance with low overpotentials for oxygen evolution and reduction reactions. The electrodes also ensure high cycle stability over many charging and discharging cycles.

At the ZSW, we developed a composite catalyst material made of carbon, nickel and manganese dioxide following a strategy based on theoretical concepts framing the current understanding of oxygen electrocatalysis. At first, the catalytic functions of the material for both oxygen reduction reaction (ORR) and oxygen evolution reaction (OER) were optimised, in terms of both properties and surface abundance, and the stability of the material properties was evidenced after electrochemical stress testing (see fig. above). In a second step the design of the gas diffusion electrode (GDE), incorporating the most promising catalyst materials and accounting for a fine-tuning of the hydrophobicity and hydrophilicity, led to the development of a positive air electrode that can be imbedded into a practical reversible Zn-air battery. Tested under current loads that are relevant for practical applications (j × t_{discharge} > 12 mA·cm⁻²·h), the GDE developed at ZSW exhibits overpotentials of ca. 0.35 V for both ORR and OER that are stable for more than 400 hours of operation.



// Auftragung der bei Sauerstoffverzehr und Sauerstoffentwicklung auftretenden Überspannungen an einer C-Ni-MnO₂-basierten Gasdiffusionselektrode (6 M KOH, t_{charge} = t_{discharge} = 2 h, j_{charge} = j_{discharge} = 10 mA·cm⁻²).
 // Overpotentials for successive charge and discharge load cycles on a C-Ni-MnO₂-based GDE (6 M KOH, t_{charge} = t_{discharge} = 2 h, j_{charge} = j_{discharge} = 10 mA·cm⁻²).

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECB ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Kernkompetenzen sind die Konstruktion, Charakterisierung und Simulation von Brennstoffzellenstacks und Komponenten, der Bau von Prototypen und die Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien.

Der Leistungsbereich der Entwicklungen von PEMFC-Komponenten und -Stacks erstreckt sich von wenigen Watt bis zu 100 kW_{el}. Wir optimieren Brennstoffzellen auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von manuellen und automatisierten Herstelltechniken für PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks einschließlich automobiltauglicher Brennstoffzellen. Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zugänglich optimiert werden. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels modernster Simulationsverfahren ein.

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



„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 main focus

The research department is specialised in the development of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) technology. Its core areas of expertise are the construction, characterisation and simulation of fuel cells stacks and components as well as the construction of prototypes and development of production and test technologies.

The power output range of our PEMFC component and stack developments starts at a few watts and extends up to 100 kW_{el}. We optimise the output, service life, efficiency and compactness of fuel cells. This also involves researching and estimating ageing processes and error analyses. We also focus on developing manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks and fuel cells suitable for vehicles. Modelling and simulating processes in fuel cells enable us to rapidly optimise component structures and operating conditions. This also includes the development and establishment of completely new approaches using advanced simulation software.

The simulation results are verified using meaningful hardware and conducting experiments under realistic conditions. For example, the water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using a μ -CT system. This system also enables GDL structures, including their water content, to be investigated under compression. In addition, analytical methods available at ZSW (for example, FIB-SEM) as well as neutron and synchrotron radiography and tomography techniques developed with the Helmholtz Centre Berlin (HZB) are available to image components, cells and stacks. These technologies enable temporal and spatial resolutions that are among the best in the world.

©FVV/Dirk Lässig



// Messung des elektrischen Widerstands von Bipolarplattenmaterialien

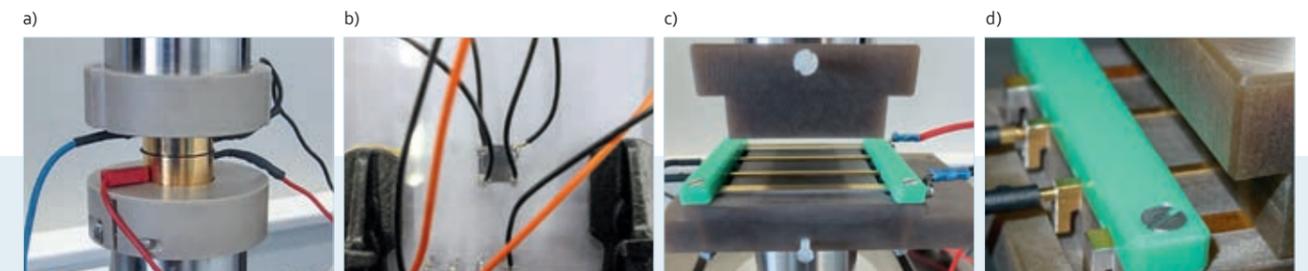
Ein Schwerpunkt des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur geförderten Projekts BePPel ist die Definition und Standardisierung der Messung des elektrischen Widerstands von graphitischen und metallischen Bipolarplattenmaterialien (BPP-Materialien) für Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Da der elektrische Widerstand der BPP-Materialien richtungsabhängig ist, ergibt sich insbesondere bei graphitischen BPP-Materialien ein relevanter Unterschied zwischen dem elektrischen Widerstand in der Ebene (IP) und durch die Ebene (TP). Zusätzlich ergeben sich verpressungsabhängige Kontaktwiderstände zwischen der Gasdiffusionslage (GDL) und der Bipolarplatte. Vor diesem Hintergrund werden die Messungen in einer Zug-Druck-Prüfmaschine durchgeführt.

Bei der Messung des TP-Widerstands kann aus dem Vergleich einer 2-Pol- und einer 4-Pol-Messung (zusätzlicher stromloser Spannungsabgriff durch Messspitzen) der Materialwiderstand und der Kontaktwiderstand separiert werden. Eine Bestimmung von Material- und Kontaktwiderstand ist auch bei reiner 2-Pol-Messung möglich, wenn eine Dickenvariation der Materialproben möglich ist. Bei metallischen BPP-Materialien kann der reine Materialwiderstand – wie ein Vergleich mit Literaturwerten im Projekt gezeigt hat – mit der Vierspitzens- und der Van-der-Pauw-Messung bestimmt werden. Die Messung des IP-Widerstands erfolgte durch einen 4-Pol-Aufbau mit zwei stromdurchflossenen Kontakten außen und zwei stromlosen Spannungsabgriffen innen (s. Abb. unten). Für die Optimierung der Messaufbauten kommen auch CFD-Rechnungen (Computational Fluid Dynamics) zum Einsatz.

// Measurement of the electrical resistance of bipolar plate materials

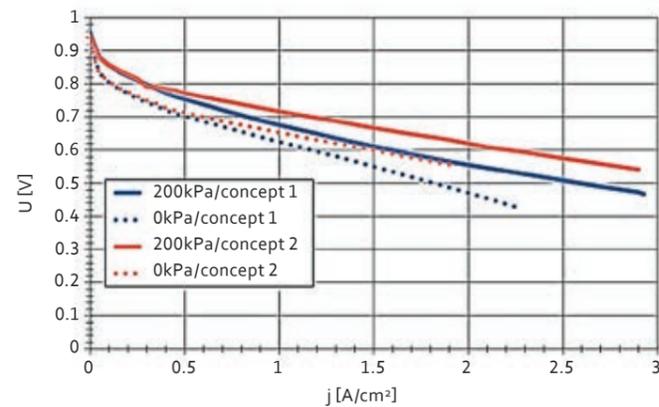
One focal point of the BePPel project funded by the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure is defining and standardising the measurement of the electrical resistance of graphitic and metallic bipolar plate materials (BPP materials) for polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC). When using graphitic BPP materials in particular, there is a relevant difference between the electrical resistance in the plane (IP) and through the plane (TP) because the electrical resistance of BPP materials is directional. There are also pressure-dependent contact resistances between the gas diffusion layer (GDL) and the bipolar plate. For this reason, the measurements are carried out in a tension/compression testing machine.

When measuring TP resistance, material resistance and contact resistance can be obtained by comparing a 2-pole and 4-pole measurement (additional currentless voltage tap with measuring tips). It is also possible to determine material and contact resistances with a purely 2-pole measurement if it is possible to vary the thickness of the material samples. The actual material resistance of metallic BPP materials (as a comparison with published values has shown during the project) can be determined with the four-tip probe and the Van der Pauw measurement. The measurement of the IP resistance was carried out using a four-pole setup with two current-bearing contacts on the outside and two currentless voltage taps on the inside (see fig. below). CFD (Computational Fluid Dynamics) calculations are used to optimise the measurement set-up.



// Vorrichtungen zur Messung des elektrischen Widerstands von BPP-Materialien:
a) TP 2- und 4-Pol; b) Van-der-Pauw; c) und d) IP 4-Pol.
// Devices for the electrical resistance measurement of BPP materials:
a) TP 2- and 4-pole b) Van-der-Pauw and c) and d) IP 4-pole.

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



// Messergebnisse: Strom-Spannungs-Kennlinien von Brennstoffzellen mit innovativen Verteilerfeldkonzepten im H₂-Luft-Betrieb.
 // Measurement results: Current-voltage curves of fuel cells with innovative flowfield concepts in H₂/air operation.



// Visualisierung der Zusammenhänge zwischen Realbetrieb im Fahrzeug und beschleunigten Alterungstests von Brennstoffzellen.
 // Visualization of the relations between real operation in the vehicle and accelerated aging tests of fuel cells.

// Disruptives PEMFC-Stack-Design mit neuer Zellarchitektur

Aktuelle PEMFC-Stack-Technologien für Automobilanwendungen haben ihre Konkurrenzfähigkeit im Vergleich zu Verbrennungsmotoren in Bezug auf Leistung und Haltbarkeit bewiesen; die Senkung der Produktionskosten ist jetzt die Hauptherausforderung für die Massenproduktion und die Kommerzialisierung von Brennstoffzellen. Um nicht nur konkurrenzfähig zu sein, sondern das weitergehende Potenzial einer neuartigen Generation von Brennstoffzellen zu zeigen, soll im Rahmen des EU-Projekts DOLPHIN ein innovativer, disruptiver Ansatz zu einer neuen Zellarchitektur mit einer auf zwei integrierte Kernkomponenten reduzierten Wiederholeinheit realisiert werden.

Unter Nutzung innovativer Ansätze in den Bereichen Zell- und Stapeldesign, Herstellertechnik, Prozessintegration, Schnittstellenqualität, Materialeffizienz und Komponenten soll eine leichte und kompakte Brennstoffzellen- und Stapelarchitektur entstehen. So soll ein bisher nicht erreichter Leistungsbereich (2 W/cm² Aktivfläche) erreicht werden, was in etwa eine Verdopplung gegenüber dem Stand von 2017 bedeutet. Die Entwicklungsarbeit innerhalb von DOLPHIN basiert auf innovativen, u. a. am ZSW entwickelten Verteilerfeldkonzepten (s. Abb. oben). Am ZSW wird im Projekt u. a. ein Testzellendesign für hohe Leistungsdichten entwickelt, das eine gleichmäßige Strömungsverteilung für einen weiten Bereich von Verteilerfeldgeometrien aufweist (s. exemplarische Strömungsverteilungen Anode, Abb. unten).

Dieses Projekt wird im Rahmen des „Horizon 2020“-Programms der EU durch das Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU) unter GA No 826204 gefördert. Das FCH 2 JU erhält Unterstützung aus dem „Horizon 2020“-Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union sowie aus Frankreich, Deutschland, Österreich, Großbritannien, Belgien, der Schweiz.

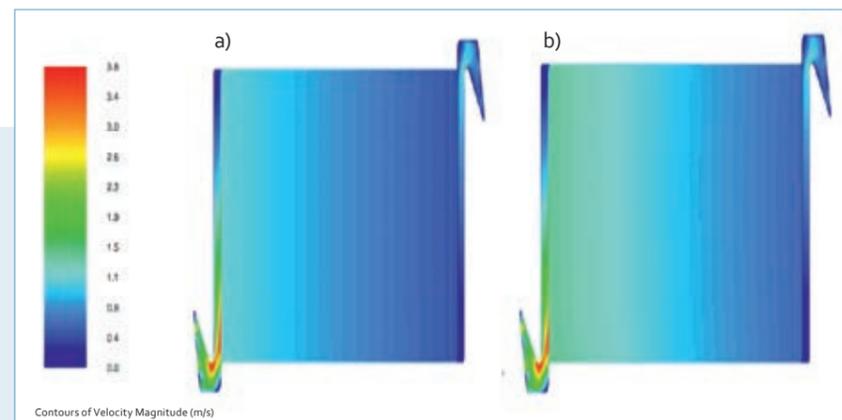
// Disruptive PEMFC stack design with new cell architecture

Current PEMFC stack technologies for automotive applications have proven their competitiveness in terms of performance and durability. Reducing production costs is currently the main challenge for the mass production and commercialisation of fuel cells. In order to not only be competitive, but also to show the further potential of a new generation of fuel cells, the EU project DOLPHIN has been aiming at implementing an innovative, disruptive approach to a new cell architecture with a repeating unit reduced to two integrated core components.

The overall project aims to create a light and compact fuel cell and stack architecture using innovative approaches in the areas of cell and stack design, manufacturing technology, process integration, interface quality, material efficiency and components. In this way, an unprecedented power range (2 W/cm² active area) is to be achieved, which is roughly double that of the 2017 level.

The development work within DOLPHIN is based on innovative distribution field concepts some of which have been developed at ZSW (see fig. above). At ZSW, the project is developed for the project, which has a uniform flow distribution for a wide range of distribution field geometries (see exemplary flow distribution anode, see fig. below).

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU) under grant agreement No 826204. The FCH 2 JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and France, Germany, Austria, the United Kingdom, Belgium and Switzerland.



// Anodenseitige Strömungsgeschwindigkeitsverteilung (CFD) für Verteilerfelder mit a) hohem und b) niedrigem längenspezifischen Druckabfall.
 // CFD results: anodic media flow distribution for flow fields with a) high and b) low length-specific pressure drop.

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

// Beschleunigte Alterungstests für automobiler Brennstoffzellenstapel

Das ZSW beteiligt sich am europäischen Kooperationsprojekt ID-FAST (2018-2020), in dem beschleunigte Alterungstests (Accelerated Stress Tests, AST) für Brennstoffzellen für automobiler Anwendungen entwickelt werden. Diese können einen wesentlichen Beitrag zur Beschleunigung und Kostensenkung bei der Entwicklung von Brennstoffzellenstapeln leisten, da die für Aussagen zur Haltbarkeit notwendigen Lebensdauertests aktuell mehrere tausend Betriebsstunden umfassen und somit insbesondere auch einen großen Kostenfaktor darstellen. Die aus der Literatur bekannten ASTs haben teilweise entscheidende Nachteile. So wird die beschleunigte Alterung z. B. durch Betriebszustände erreicht, die im automobilen Realbetrieb nicht vorkommen. Damit ist fraglich, ob die Alterung der Zellen auf denselben mikroskopischen Mechanismen beruht. Weiterhin ist eine zeitliche Korrelation zur Alterung unter Realbedingungen meist unklar (s. Abb. oben).

Das Besondere am Ansatz von ID-FAST ist, dass auf der Basis realistischer Lebensdauertests zunächst die für die Alterung relevanten Stressfaktoren in den Betriebsbedingungen identifiziert werden. Darauf aufbauend werden dann Module für ASTs entwickelt, die diese Faktoren verstärken. Im zweiten Schritt werden sogenannte Transferfunktionen (s. Abb. unten) aufgestellt, die einen quantitativen Zusammenhang zwischen der Alterung im automobilen Betrieb und im Test mittels ASTs herstellen sollen. Das ZSW leistet hierzu vielfältige Beiträge, z. B. bei der Prozedurenentwicklung, durch Dauertests, bei der Untersuchung gealterter Komponenten und mittels Modellierung der Alterungsvorgänge.

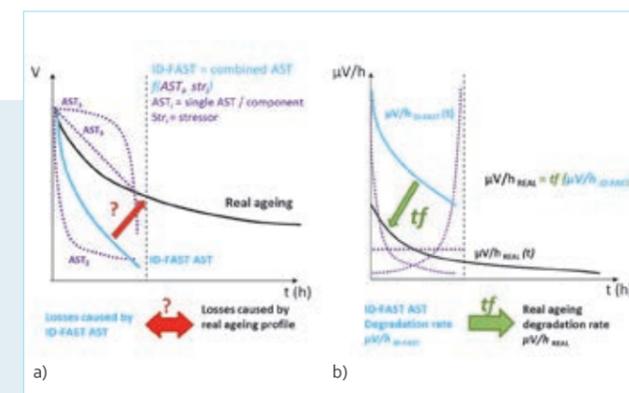
Dieses Projekt wird im Rahmen des „Horizon 2020“-Programms der EU durch das Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU) unter GA No 779565 gefördert.

// Development of accelerated stress tests for automotive fuel cell stacks

ZSW participates in the European cooperation project ID-FAST (2018-2020), in which accelerated stress tests (AST) are developed for automotive applications. The project will make a significant contribution to acceleration and cost reduction in the development of automotive fuel cell stacks, since the lifespan tests necessary for statements on durability currently comprise thousands of operating hours and thus particularly represent a major cost factor. The ASTs known from the literature sometimes have decisive disadvantages. Accelerated aging is, for example, achieved through operating conditions which do not occur in real automotive operation. It is therefore questionable whether the ageing of the cells is based on the same microscopic mechanisms. Furthermore, a temporal correlation with ageing under real conditions is mostly unclear (see fig. above).

The special thing about the ID-FAST approach is that, based on realistic life tests, the stress factors relevant to ageing are identified in the operating conditions. Building on this, modules for ASTs that enhance these factors are developed. In the second step, so-called transfer functions (see fig. below) are set up, which should establish a quantitative relationship between ageing in automotive operation and testing using ASTs. ZSW makes various contributions to this, for example in the development of procedures, in endurance tests, in the examination of aged components and by modelling the ageing processes.

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 779565.



// a) Zusammenhang zwischen im Realbetrieb über die Zeit beobachteten und durch einen kombinierten AST verursachten Abfall der Zellspannung; b) Transferfunktion, die quantitativ die reale Degradationsrate mit der durch den AST erreichten verknüpft.
 // a) relationship between the cell voltage observed over time in real operation and in combination with accelerated ageing and b) transfer function which quantitatively links the real degradation rate with the one achieved through AST.

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

// 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 Brennstoffzellenstacks, -systemen und -systemkomponenten. Zur Bewertung der Qualität, z. B. des Leistungsverhaltens und von Alterungsvorgängen von Brennstoffzellenstacks, stehen eine umfangreiche Analytik sowie komplexe Methoden zur Fehleranalyse zur Verfügung.

In die Entwicklung von Brennstoffzellensystemen 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 meist in Industrieprojekten Sicherheitsbewertungen, Packaging-Studien und Produktzertifizierungen durchgeführt. Mit öffentlich geförderten Projekten werden Erkenntnisse generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

Einen neueren Schwerpunkt der Arbeiten bildet das Thema Wasserstoff als Kraftstoff. Das Fachgebiet mit seinem tiefen Verständnis der Brennstoffzellentechnik und damit der Nutzung von Wasserstoff ist durch mehrere Projekte in den Aufbau der europäischen Wasserstoffinfrastruktur eingebunden. Hierbei geht es um die Einhaltung internationaler Betankungsprotokolle für Wasserstofftankstellen (SAE J2601/CEP) bezüglich der Abnahme nach DIN ISO 19880 sowie um die 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 for stationary systems, and from on-board and emergency power supplies to 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. Publicly funded projects generate findings that are available to the general public.

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.

// Brennstoffzellentests und Wasserstofftechnik

Im Brennstoffzellen-Testfeld des ZSW wurde im Jahr 2019 mit über 21 Tonnen Wasserstoff (H₂) ein neuer Umsatzrekord erreicht. Durch die Gewinnung neuer Industriekunden war das Testfeld maximal ausgelastet. Die Anzahl von Stapel-Teststunden erreichte mit über 80.000 Stunden im Berichtsjahr ebenfalls einen neuen Rekord.

Durch den Betrieb unterschiedlicher Brennstoffzellenstapel verschiedener Hersteller konnte ein positiver Trend in Bezug auf die Robustheit der Brennstoffzellen nachgewiesen werden. Dennoch muss die Qualität von Wasserstoff und Luft zur Weiterentwicklung der Brennstoffzellen besser untersucht werden. Die Herausforderung liegt darin, „grünen“ Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen zu bezahlbaren Kosten und gemäß internationalen Normen wie DIN EN 17124 herzustellen und beispielsweise an H₂-Tankstellen bereitzustellen. Mit dem Thema H₂ als Kraftstoff beschäftigt sich das ZSW im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten HYDRAITE-Projektes sowie im Verbundvorhaben H₂-Fuel im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms (NIP II). Seit der Inbetriebnahme des Wasserstoff-Qualitätslabors „HyLab“ im Jahr 2018 wurden erste Vollanalysen nach ISO 14687-2 im Industrieauftrag durchgeführt. Neben den Laboranalysen wurden 14 Abnahmen von nationalen H₂-Tankstellen nach internationaler Norm SAE J2601 durchgeführt; weitere Abnahmen stehen aus.

Daneben stieg auch die Nachfrage nach Schulungen zum Thema H₂-Tankstellen und Brennstoffzellen seitens der Industrie. Die höhere Anzahl von Bauteilen in Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich zu rein batterieelektrischen Fahrzeugen bietet Potenzial für eine höhere Wertschöpfungstiefe. Und Brennstoffzellensysteme weisen, bedingt durch die nach außen offene Medienzufuhr von Wasserstoff und Prozessluft, eine höhere Ähnlichkeit zum klassischen Verbrennungsmotor auf.

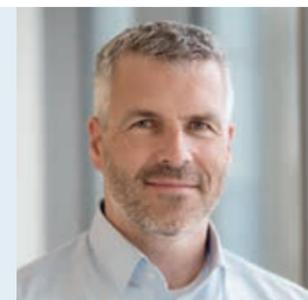
// Neues Wasserstofflabor am Ulmer ZSW zur Analyse gemäß ISO-Norm 14687 (HyLab).
// New hydrogen laboratory at ZSW in Ulm for conducting analyses according to ISO standard 14687 (HyLab).

// Fuel cell tests and hydrogen technology

ZSW's fuel cell testing centre achieved a new record in 2019 with over 21 tonnes of hydrogen (H₂) used for testing. The acquisition of new industrial customers has meant that the testing centre has been working at maximum capacity. The number of stack test hours also reached a new record with over 80,000 hours per year.

The operation of different fuel cell stacks from various manufacturers has revealed a positive trend in terms of the robustness of the fuel cells. Nevertheless, the quality of hydrogen and air needs to be investigated in greater detail in order to further develop fuel cells. The challenge is to produce "green" hydrogen from renewable sources at affordable prices and in accordance with international standards such as DIN EN 17124, and to make it available at H₂ filling stations, for example. ZSW is studying the topic of H₂ as a fuel as part of the HYDRAITE project funded by the European Union and in the joint H₂ Fuel project within the framework of the National Innovation Programme (NIP II). Since the HyLab hydrogen quality laboratory was commissioned in 2018, the first full analyses according to ISO 14687-2 have been carried out on behalf of industry. In addition to the laboratory analyses, 14 national H₂ filling stations have been inspected and approved according to the international SAE J2601 standard, and further approval procedures are pending.

In addition, there has also been increasing demand from industry for training courses on the subject of H₂ filling stations and fuel cells. The higher number of components in fuel cell vehicles relative to purely battery-electric vehicles offers potential for a greater depth of value creation. Also, the open media supply of hydrogen and process air means that fuel cell systems are more similar to conventional combustion engines.



„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."



// H₂-Tankstellen-Abnahme in Neuruppin. 2019 wurden insgesamt 14 Abnahmen gemäß SAE J2601 2019 durchgeführt.
// Inspection and approval procedure being conducted at an H₂ filling station in Neuruppin. In 2019, 14 inspection and approval procedures were carried out in accordance with SAE J2601 2019.

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

// Öffentlichkeitsarbeit // Public Relations



Unsere Themen sind so spannend wie komplex. Darum informieren wir Wirtschaft, Politik und Gesellschaft nachvollziehbar und neutral über neue Technologien für die Energiewende. Denn nur wer Innovationen versteht, kann sie bewerten und ihre Umsetzung in die Praxis unterstützen – und so dazu beitragen, eine klimaneutrale Energieversorgung zu gestalten. Mit dem folgenden Rückblick vermitteln wir Ihnen einen Eindruck von unseren Veranstaltungen und unserer Medienarbeit 2019.

Our topics are as exciting as they are complicated. This is why we provide information on 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 thus help to shape a climate-neutral energy supply. The following review will offer an impression of our events and our media work in 2019.

// STAATSSSEKRETÄR BILGER BESUCHT ULMER H₂- UND BRENNSTOFFZELLENFORSCHUNG

Am 7. März hat eine hochrangige Delegation um Steffen Bilger, Parlamentarischer Staatssekretär im Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und Koordinator der Bundesregierung für Güterverkehr und Logistik, das ZSW in Ulm besucht. Zu der Gruppe gehörten Ronja Kemmer, CDU-Mitglied des Deutschen Bundestages, Dr. Thomas Kienle, Fraktionsvorsitzender des Ulmer CDU-Stadtverbandes, und weitere Gemeinderäte der CDU-Stadtratsfraktion. Neben Trends und Ergebnissen aus der Wasserstoff- und Brennstoffzellenforschung am ZSW stand das mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg und weiteren Akteuren aus Wissenschaft und Industrie entwickelte Projekt „HyFaB-Baden-Württemberg – Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff“ im Zentrum des Treffens. Das Vorhaben soll die Zulieferindustrie stärken und ein Angebot schaffen, um automatisierte Fertigungs- und Qualitätssicherungsverfahren für Brennstoffzellen zu entwickeln.

// STATE SECRETARY BILGER VISITS H₂ AND FUEL CELL RESEARCH

On 7 March, a high-ranking delegation led by Steffen Bilger, Parliamentary State Secretary in the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI) and the federal government coordinator for freight transport and logistics, visited ZSW in Ulm. The group included Ronja Kemmer, CDU member of the German Bundestag, Dr. Thomas Kienle, leader of Ulm's CDU city association and other CDU members of the city council. In addition to trends and results from hydrogen (H₂) and fuel cell research at ZSW, the gathering focussed on the HyFaB-Baden-Württemberg – Research Factory for Fuel Cells and Hydrogen (HyFaB-Baden-Württemberg – Forschungsfabrik für Brennstoffzellen und Wasserstoff) project developed in collaboration with the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) and other players from science and industry. The project aims to strengthen the supply industry and create services to develop automated production and quality assurance processes for fuel cells.



// Staatssekretär Steffen Bilger besucht Ulmer H₂- und Brennstoffzellenforschung.
// State Secretary Steffen Bilger visits H₂ and fuel cell research in Ulm.

// GRÜNE LANDTAGSABGEORDNETE BESICHTIGEN SOLAR-TESTFELD WIDDERSTALL UND ZSW ULM

Nachdem die grünen Landtagsabgeordneten im Vorjahr das ZSW in Stuttgart besucht hatten, statteten sie in diesem Jahr dem Solar-Testfeld Widderstall und dem Labor für Batterietechnologie eLaB in Ulm einen Besuch ab. Seit 1989 betreibt das ZSW das Testfeld für Photovoltaikmodule und Systeme in Widderstall bei Merklingen auf der Schwäbischen Alb. Der Standort auf ca. 750 m über dem Meeresspiegel ist durch sehr gute Sonneneinstrahlungsbedingungen und kalte, schneereiche Winter charakterisiert. PV-Module werden im Rahmen von Vergleichstests im Auftrag von Unternehmen oder Finanzinstitutionen kontinuierlich vermessen und Daten zu Leistungsverhalten oder Alterungseffekten gewonnen. Anschließend führen die Mitglieder des Landtags nach Ulm und informierten sich über Forschungsaktivitäten zu Batterien und Brennstoffzellen.

// STATE PARLIAMENTARIANS FROM THE GREEN PARTY VISIT WIDDERSTALL SOLAR TEST FACILITY AND ZSW ULM

After visiting ZSW in Stuttgart last year, state parliament members from the Green Party visited the Widderstall solar test facility and the eLaB laboratory for battery technology in Ulm this year. Since 1989, ZSW has operated a test facility for solar modules and solar power systems in Widderstall near Merklingen in the Swabian Alb. The site, which is located about 750 metres above sea level, features excellent solar irradiation conditions and cold winters with considerable amounts of snow. On behalf of manufacturers and financial institutions PV modules are continually measured as part of comparative tests, and data is obtained on their performance behaviour and ageing effects. They then travelled to Ulm to find out about research activities on batteries and fuel cells.

// START CELEST UND POLIS

Ende März wurde CELEST mit über 100 Gästen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik offiziell eröffnet. Mit dem Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe (CELEST) hat eine der größten Forschungsplattformen weltweit die Arbeit aufgenommen. Die Gründungspartner KIT, Universität Ulm und ZSW bündeln in CELEST ihre Kompetenzen in 29 Instituten und 45 Arbeitsgruppen – von der Grundlagenforschung bis zur Batterieproduktion. Das Ziel ist klar: Für ein Gelingen der Energiewende und für die Elektromobilität sollen hochleistungsfähige und umweltfreundliche Lithium-Ionen-Batterien, Post-Lithium-Technologien sowie Brennstoffzellen und Redox-Flow-Batterien erforscht werden. Die Feier markierte zudem den Auftakt des bundesweit einzigen Exzellenzclusters des Bundes in der Batterieforschung POLiS, das neue Speicher u. a. mit Magnesium oder Natrium erforscht.

// CELEST AND POLIS LAUNCH

CELEST was officially inaugurated at the end of March with over 100 guests from science, business and politics. The Center for Electrochemical Energy Storage Ulm & Karlsruhe (CELEST), which is one of the world's largest research platforms, has now started work. Its founding partners, the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), the University of Ulm and ZSW, are combining their expertise in 29 institutes and 45 working groups in CELEST – ranging from basic research to battery production. The goal is clear: to ensure a successful energy transition and electromobility, research will be conducted on high-performance and environmentally friendly lithium-ion batteries, post-lithium technologies, fuel cells and redox flow batteries. The ceremony also marked the launch of POLiS, the federal government's only cluster of excellence on battery research in Germany, which is researching new storage systems using, for example, magnesium or sodium.



// Landtagsfraktion der Grünen besucht das Batterietestzentrum des ZSW Ulm bei Dr. Harry Döring.
// The Green Party parliamentary group visited ZSW Ulm's battery test centre under the supervision of Dr. Harry Döring.



// Protagonisten der CELEST-Eröffnung (v. l.):
// Protagonists at the CELEST inauguration (from the left): Prof. Fichtner (HIU, Direktor CELEST, POLiS), Prof. Hanselka (Präsident KIT), Ministerialdirektor Steinbach (Amtschef MWK), Staatssekretär Luft (BMBF), Dr. Wohlfahrt-Mehrens (ZSW, CELEST, POLiS), Prof. Ehrenberg (KIT, CELEST, POLiS), Prof. Weber (Präsident Universität Ulm) und Prof. Groß (Universität Ulm, CELEST, POLiS).



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Die südkoreanische Delegation zum Thema Smart Grids und Netzintegration erneuerbarer Energien am ZSW in Stuttgart.
// The South Korean delegation on smart grids and grid integration of renewable energies at ZSW in Stuttgart.

// BESUCH EINER SÜDKOREANISCHEN DELEGATION AM ZSW IN STUTTGART

Baden-Württemberg International, die Wirtschaftsfördergesellschaft des Landes Baden-Württemberg, empfing im Rahmen der Exportinitiative Energie des BMWi eine südkoreanische Delegation zum Thema Smart Grids, Netzintegration erneuerbarer Energien, Netzausbau und -flexibilisierung. Die Delegation setzte sich zusammen aus Vertretern des staatlichen südkoreanischen Energieversorgers KEPCO, des Netzbetreibers KIER sowie weiteren Vertretern aus Verwaltung und Forschung. Die Gruppe informierte sich bei ihrem Besuch am ZSW in Stuttgart über aktuelle Forschungsprojekten im Bereich der Netzintegration erneuerbarer Energiequellen und Smart Charging für die E-Mobilität.

// ZSW AUF DER NOBELPREISTRÄGER-TAGUNG

An der Abschlussfahrt zur Insel Mainau unter dem Motto „Your first step to Stockholm: Baden-Württemberg“ nahmen insgesamt 18 Nobelpreisträgerinnen und -träger und rund 600 Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler aus 80 Ländern teil. Die Gäste der Tagung hatten vielfältige Möglichkeiten, sich über den Wissenschaftsstandort Baden-Württemberg zu informieren. Auf der „MS Sonnenkönigin“ präsentierte auch das ZSW aktuelle Arbeiten und Ergebnisse zum diesjährigen Schwerpunktthema Physik: Der Amtschef des Ministeriums für Wissenschaft und Kunst, Ministerialdirektor Ulrich Steinbach, ließ sich am ZSW-Stand die Technologie der CIGS-Dünnschichtsolarzellen vorstellen. Anschließend besuchte eine Delegation junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das ZSW in Ulm und informierte sich dort über die Arbeiten zur Batterie- und Brennstoffzellentechnologie.

// SOUTH KOREAN DELEGATION VISITS ZSW IN STUTTGART

Baden-Württemberg International, the business development agency for the federal state of Baden-Württemberg, received a South Korean delegation focussing on smart grids, the grid integration of renewable energies, grid expansion and flexibilisation as part of the BMWi's Energy Export Initiative. The delegation included representatives from the South Korean state energy supplier KEPCO, grid operator KIER and other representatives from administration and research. During their visit to ZSW in Stuttgart, the group learned about current research projects on the grid integration of renewable energy sources and smart charging for e-mobility.

// ZSW AT NOBEL LAUREATE MEETING

18 Nobel Prize laureates and around 600 young scientists from 80 countries joined the closing trip to Mainau island under the motto "Your first step to Stockholm: Baden-Württemberg". The conference guests had diverse opportunities to find out more about scientific activities in Baden-Württemberg. On board the MS Sonnenkönigin cruise ship, ZSW also presented its current work and results on this year's main topic of physics: Ministerial Director Ulrich Steinbach, who is head of the Ministry of Science and Art (MWK), was able to view the technology behind CIGS thin-film solar cells at ZSW's stand. Afterwards, a delegation of young scientists visited ZSW in Ulm and learned about its activities on battery and fuel cell technology.



// Ministerialdirektor Ulrich Steinbach (links), Amtschef des MWK, am Stand des ZSW auf der „MS Sonnenkönigin“ mit Andreas Bauer und Julia Zillner, ZSW-Spezialisten für CIGS-Dünnschichtsolarzellen.
// Ministerial Director Ulrich Steinbach (left), head of the MWK, at ZSW's stand on board the MS Sonnenkönigin with Dr. Andreas Bauer and Julia Zillner, ZSW specialists for CIGS thin-film solar cells.



// Nobelpreisträgertagung: Delegation von Nachwuchswissenschaftlern besucht Ulmer Brennstoffzellen-Forschung.
// Nobel Prize laureate conference: delegation of young scientists visit the fuel cell research facilities in Ulm.



// M. Stanley Whittingham erfährt auf der 12. ABAA in Ulm von seinem Nobelpreis für Lithium-Ionen-Batterien.
// M. Stanley Whittingham learns about his Nobel Prize for lithium-ion batteries at the 12th ABAA in Ulm.

// 12. ABAA – NOBELPREISTRÄGER HAUTNAH

Die Batteriekonferenz ABAA (Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications) vom 7. bis 9. Oktober neigte sich schon dem Ende zu, als diese Nachricht eintraf: Der 77-jährige M. Stanley Whittingham hielt gerade seine Rede, als die Schwedische Akademie aus Stockholm versuchte, ihn zu erreichen. Die Akademie rief schließlich bei der Tagungsleiterin Margret Wohlfahrt-Mehrens (ZSW) an, um die Nachricht zu übermitteln: Stanley Whittingham erhält zusammen mit John B. Goodenough und Akira Yoshino für die Erfindung der Lithium-Ionen-Batterie den Chemie-Nobelpreis.

// BUNDESFORSCHUNGS MINISTERIN ANJA KARLICZEK BESUCHT ULMER BATTERIEFORSCHUNG

Die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Anja Karliczek, besuchte am 15. Juli die Ulmer Wissenschaftsstadt, um sich ein Bild von der Batterieforchung zu machen. Der Standort ist ein international führendes Zentrum der elektrochemischen Energieforchung, von den Grundlagen bis zur Produktion: Am Helmholtz-Institut Ulm (HIU), an der Universität Ulm sowie am ZSW forschen über 300 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an hochleistungsfähigen und umweltfreundlichen Energiespeichern der Zukunft. Von diesen – nicht zuletzt für die klimafreundliche Elektromobilität und Energiewende bedeutenden – Forschungsaktivitäten ließ sich die Bundesforschungsministerin bei ihrem Besuch überzeugen.



// Bundesministerin Karliczek besichtigte im ZSW die industriellen Produktionsanlagen für Lithium-Ionen-Zellen.
// Federal Minister Karliczek visited the industrial production facilities for lithium-ion cells at ZSW.



// 12th ABAA – NOBEL LAUREATE UP CLOSE

The ABAA (Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications) battery conference from 7 to 9 October was already drawing to a close when this news arrived: 77-year-old M. Stanley Whittingham was just giving his speech when the Swedish Academy in Stockholm tried to contact him. The Academy finally called conference leader Margret Wohlfahrt-Mehrens (ZSW) to deliver the message: Stanley Whittingham was awarded the Nobel Prize for Chemistry together with John B. Goodenough and Akira Yoshino for inventing the lithium-ion battery.

// FEDERAL RESEARCH MINISTER ANJA KARLICZEK VISITS ULM'S BATTERY RESEARCH FACILITIES

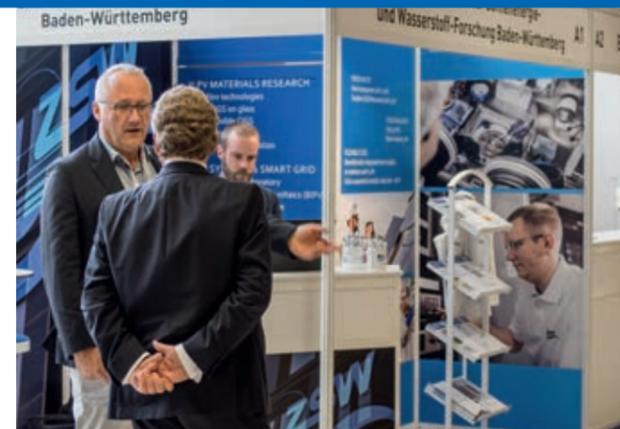
The German Federal Minister of Education and Research, Anja Karliczek, visited the Science City of Ulm on 15 July in order to learn more about battery research. The city is an internationally leading centre for electrochemical energy research, ranging from basic research to production: more than 300 scientists at the Helmholtz Institute Ulm (HIU), the University of Ulm and ZSW are researching high-performance and environmentally friendly energy storage systems of the future. During her visit, the Federal Research Minister was impressed by these research activities, which are important for climate-friendly electromobility and the energy transition.





// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// ZSW-Infostand beim Dies academicus der Universität Ulm.
// ZSW information stand at the Dies academicus held by the University of Ulm.



// Neueste Dünnschichttechnologien präsentierten die Photovoltaikexperten des ZSW auf der 36. EU PVSEC in Marseille.
// ZSW's photovoltaic experts presented their latest thin-film technologies at the 36th EU PVSEC in Marseille.



// Auf der Intersolar Europe in München kamen die ZSW-Dienstleistungen rund um die Qualität von Solarmodulen gut an.
// ZSW's services for quality testing of solar modules were popular at the Intersolar Europe in Munich.

// AUSSTELLUNGEN UND MESSEN 2019:

Dies academicus 2019, Universität Ulm	8.2.2019
34. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	19.–21.3.2019
Hannover Messe Industrie	1.–5.4.2019
Intersolar Europe, München	15.–17.5.2019
36. European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition (EU PVSEC), Marseille	9.–13.9.2019
PV-Wind-Betreiberkonferenz	14.10.2019

// EXHIBITIONS AND TRADE FAIRS 2019:

Dies academicus 2019, University of Ulm	8/2/2019
34 th Symposium Photovoltaic Solar Energy, Bad Staffelstein	19–21/3/2019
Hannover Messe (Hanover Industrial Trade Fair)	1–5/4/2019
Intersolar Europe, Munich	15–17/5/2019
36 th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition (EU PVSEC), Marseille	9–13/9/2019
PV/Wind Operator Conference	14/10/2019

// EXZELLENZCLUSTER CELEST BEIM DIES ACADEMICUS DER UNIVERSITÄT ULM

Zum Festakt beim Dies academicus an der Universität Ulm gab es Exponate und Informationsstände: Das Helmholtz-Institut Ulm (HIU), das ZSW, das Institut für Elektrochemie der Universität Ulm und das Center für Electrochemical Energy Storage (CELEST) präsentierten Exponate zum aktuellen Stand und zu zukünftigen Entwicklungen bei Batterien und Brennstoffzellen.

// CELEST CLUSTER OF EXCELLENCE AT ULM UNIVERSITY'S DIES ACADEMICUS

There were exhibits and information stands at the official ceremony marking the Dies academicus at the University of Ulm: the Helmholtz Institute Ulm (HIU), ZSW, Ulm University's Institute for Electrochemistry and the Center for Electrochemical Energy Storage (CELEST) presented exhibits showing the current status and future developments of batteries and fuel cells.

// HANNOVER MESSE INDUSTRIE, BADEN-WÜRTTEMBERG-PAVILLON

Zum 19. Mal zeigte das ZSW vom 1. bis 5. April 2019 seine Kompetenzen einem Fachpublikum aus aller Welt auf der Hannover Messe. Die Kernthemen des Baden-Württemberg-Pavillons der Leitmesse ENERGY in Halle 27 waren hybride und elektrische Antriebe, mobile und stationäre Energiespeicher, alternative Kraft- und Brennstoffe sowie ganzheitliche Mobilitätstechnologie-Lösungen. Das ZSW positionierte sich mit Exponaten zu Batterien und Brennstoffzellen.

// HANNOVER INDUSTRIAL TRADE FAIR, BADEN-WÜRTTEMBERG PAVILION

For the 19th time, ZSW showcased its expertise to a specialist audience from all over the world at the Hannover Messe trade fair from 1 to 5 April 2019. The Baden-Württemberg pavilion at the leading ENERGY trade fair in Hall 27 focussed on hybrid and electric drives, mobile and stationary energy storage systems, alternative fuels and combustibles as well as holistic mobility technology solutions. ZSW presented exhibits on batteries and fuel cells.

// ZSW AUF DER EU PVSEC IN MARSEILLE

An der 36. European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) vom 9. bis 13. September 2019 in Marseille war der Geschäftsbereich Photovoltaik mit einem Vortrag, drei Postern und einem Messestand beteiligt. Zudem sind ZSW-Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler im Scientific Committee als Topic Organizer und Paper Reviewer engagiert. Am gut besuchten Messestand wurden aktuelle Forschungsergebnisse aus den Bereichen CIGS- und Perowskit-Dünnschichttechnologie und Tandemsolarzellen präsentiert.

// ZSW AT THE EU PVSEC IN MARSEILLE

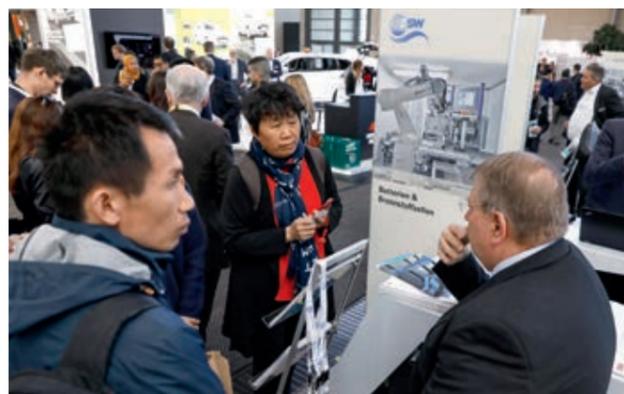
The Photovoltaics Department participated with one lecture, three posters and an exhibition booth in the 36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC) in Marseille, which was held from 9–13 September 2019. ZSW scientists are also involved in the Scientific Committee as Topic Organisers and Paper Review Experts. The well-attended exhibition booth presented the latest research results from the CIGS, perovskite thin-film and tandem solar cell technology fields.

// MEDIENARBEIT

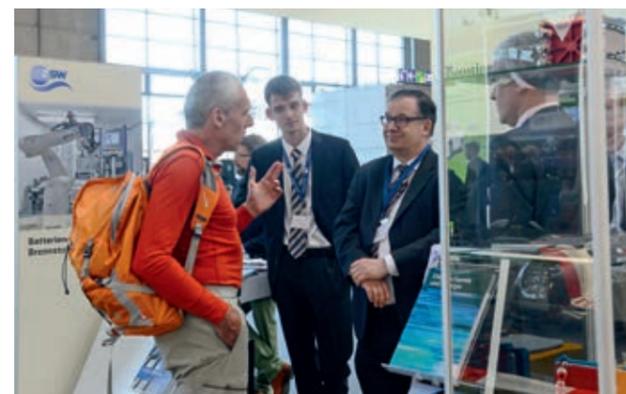
Die Medienarbeit des ZSW ist aufgrund der attraktiven Forschungsthemen weiterhin sehr erfolgreich. 2019 wurde insgesamt 3.359 Mal über das Institut berichtet – eine Steigerung von 23 % gegenüber 2018. Stärker noch als in den vergangenen Jahren war das ZSW auch 2019 in den wichtigsten regionalen und überregionalen Leitmedien wie *Handelsblatt*, *WirtschaftsWoche*, *Süddeutsche Zeitung*, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, *Stuttgarter Zeitung* sowie ARD, ZDF und SWR vertreten.

// MEDIENARBEIT

Thanks to its attractive research topics, ZSW has been able to continue its successful public relations work. In 2019, a total of 3,359 reports were made about the institute – a 23% increase compared to 2018. In 2019, ZSW was even more strongly represented than in previous years in the most important regional and national leading media such as the *Handelsblatt*, *WirtschaftsWoche*, *Süddeutsche Zeitung*, *Frankfurter Allgemeine Zeitung* and *Stuttgarter Zeitung* newspapers as well as the ARD, ZDF and SWR TV channels.



// Batterie- und Brennstoffzellenexperten des ZSW beteiligten sich auf der Hannover Messe am Gemeinschaftsstand der e-Mobil BW.
// ZSW's battery and fuel cell experts appeared at the joint stand together with e-Mobil BW at the Hannover Messe.



// ZSW-Boot beim „Nabada“ (schwäbisch für „Hinunterbaden“) auf der Donau am Ulmer Schwörmontag.
// The ZSW boat at the “Nabada” (Swabian for “swimming down the river”) event on the Danube on Ulm's Schwörmontag holiday.

// Dokumentation

// Documentation



// Finanzielle Entwicklung Financial Development



// EINNAHMEN – AUSGABEN

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 47,8 Mio. Euro und damit über dem Niveau des Vorjahres, weil hohe Zuwendungen für die Finanzierung von Investitionen im Themenfeld Photovoltaik Materialforschung zugegangen sind.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2019 um 0,1 Mio. auf 4,8 Mio. Euro.

// REVENUE – EXPENDITURE

The income volume for ordinary business activities amounted to EUR 47.8 million in the past year, higher than in previous years due to special investment funding for photovoltaic materials research.

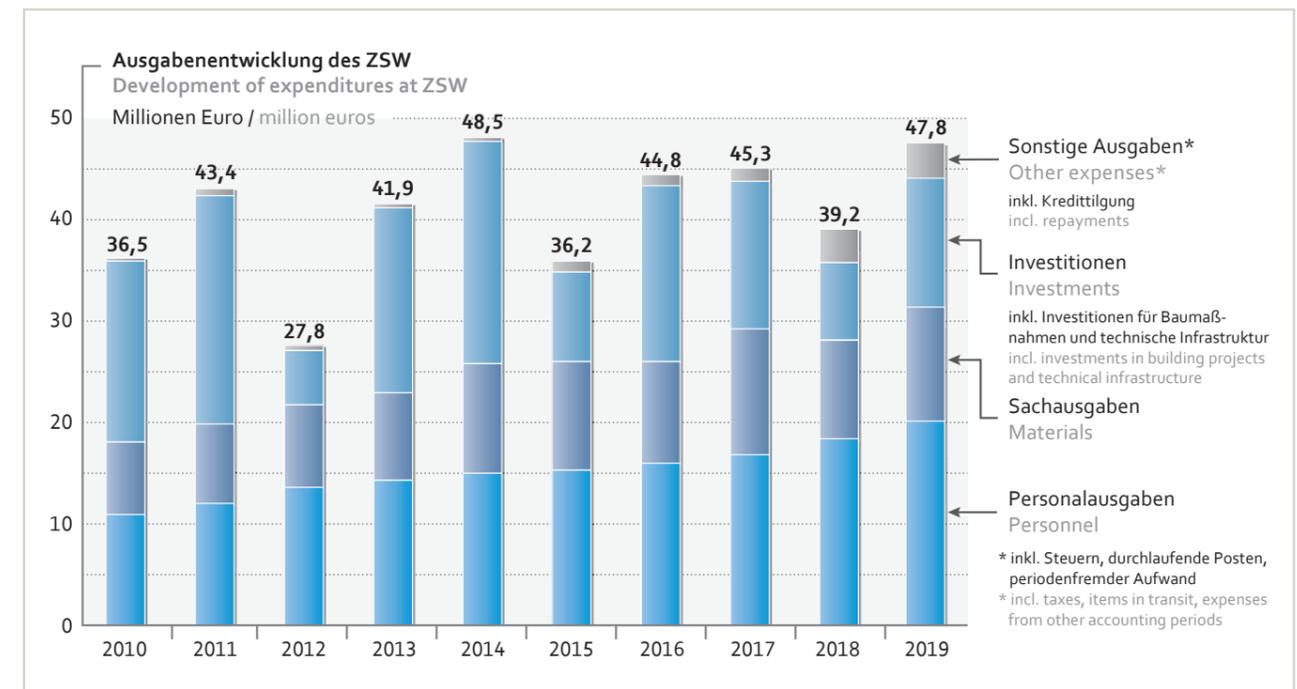
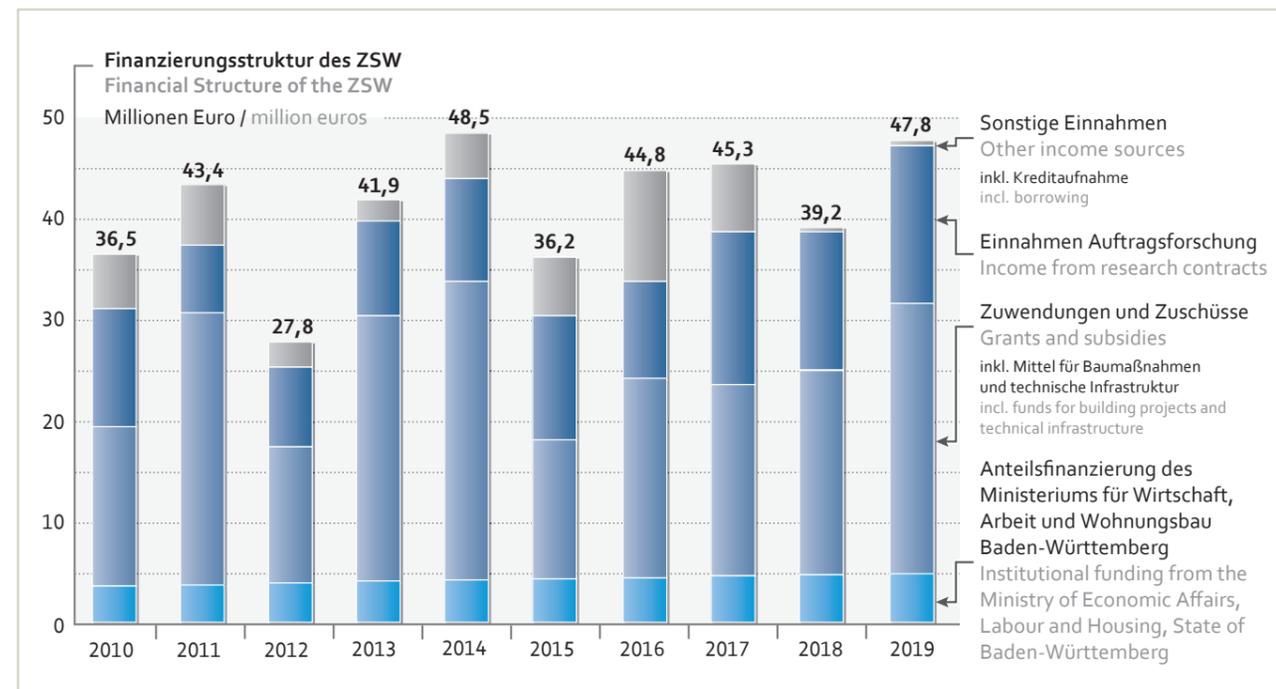
The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased by 0.1 million to EUR 4.8 million in 2019.

Das Ausgabevolumen erhöhte sich im Berichtsjahr korrespondierend auf 47,8 Mio. Euro.

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

The expenditure volume correspondingly increased to EUR 47.8 million in the reporting year.

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 232 Vollzeitstellen auf 253 erhöht. Das entspricht einer Mitarbeiterzahl von 275. Mit einem Anteil von 84 % 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 19 verschiedenen Ländern kamen.

Der Frauenanteil lag bei 23 %. 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 30 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt rund 150 Beschäftigte teilnahmen. Darüber hinaus standen im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements am ZSW u. a. Angebote zu den Themen Bewegung, Stressprävention, Ernährung und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm.

// 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 232 to 253 full-time equivalents in 2019. This corresponds to 275 employees. With 84% of all staff active in the scientific and technical area, productivity remains at a stable high level.

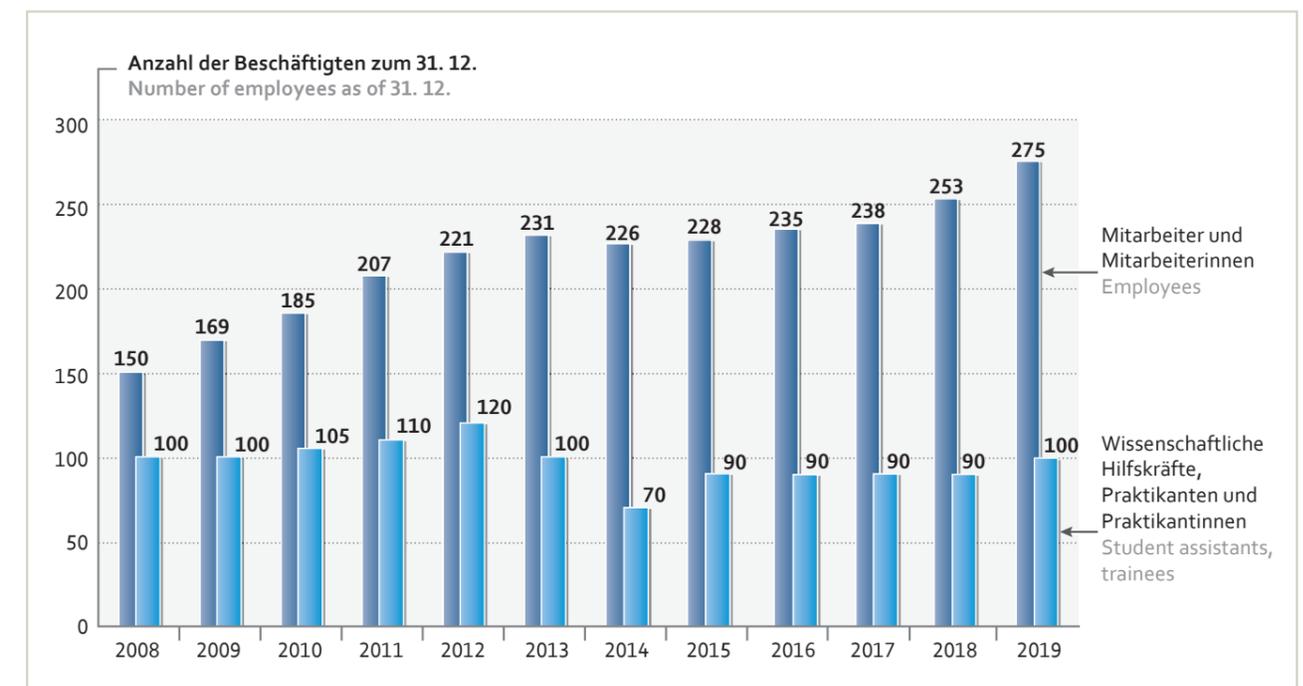
ZSW is also attractive to scientists from abroad. For example, a good 10% of all employees had a foreign nationality: they came from 19 different countries.

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

Our highly-qualified and motivated employees are ZSW's key success factor. ZSW therefore offers a broad range of training and continuing professional development with both specialist and interdisciplinary content, as well as personal development and executive training. The employees are very interested in this offer: more than 30 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, among others.

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 2019 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 100 Studierende und Praktikanten am ZSW beschäftigt. Im Berichtsjahr fertigten 27 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 100 students and interns in 2019. In the reporting year, 27 doctoral candidates completed their doctoral theses.



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications



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

- / Arnold A. (ZIRIUS), Bangert A. (KIT), Dreyer M. (dialogik), Nabitz L. (KIT), Scheer D. (KIT), Schmidt M.; **Das Kopernikus-Projekt Enavi – Die Transformation des Verkehrssystems mit Fokus auf Policy Packages**; Karlsruhe, Nov. 2019; <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000100204>
- / Banerjee R. (KIT), Bevilacqua N. (KIT), Mohseninia A., Wiedemann B., Wilhelm F., Scholta J., Zeis R. (KIT); **Carbon felt electrodes for redox flow battery: Impact of compression on transport properties**; Journal of Energy Storage 26 (2019) 100997; <https://dx.doi.org/10.1016/j.est.2019.100997>
- / Berckmans G. (VUB), De Sutter L. (VUB), Marinaro M., Smekens J. (VUB), Jaguemont J. (VUB), Wohlfahrt-Mehrens M., von Mierlo J. (VUB), Omar N. (VUB); **Analysis of the effect of applying external mechanical pressure on next generation silicon alloy lithium-ion cells**; Electrochimica Acta 306 (2019) 387-395; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.138>
- / Derpa U. (Main-Tauber-Kreis), Frey M. (HS Kehl), Hager G. (Regionalverb. Mittl. Oberrhein), Jenssen T. (Verband Region Stuttgart), Rettenmeier A.; **Windenergie erfolgreich gestalten, Energiewende in Kommunen**, Band 2, Richard Boorberg Verlag, 2019 (ISBN 978-3-415-06467-6)
- / Gogel V., Sakthivel M. (Dechema), Bender J. (Univ. Stuttgart), Salzmann B. (Univ. Stuttgart), Kerres J. (Univ. Stuttgart), Scholta J., Drillet J.-F. (Dechema); **New materials and flow field design for middle-temperature direct methanol fuel cell with low cathode pressure**; Fuel Cells Vol. 19, Issue 3, June 2019, pp 256-257; <https://doi.org/10.1002/uce.201800172>
- / Kartouzian D., Mohseninia A., Markötter H. (HZB), Langner P., Scholta J., Manke I. (HZB); **Impact of porosity gradients within catalyst layer and MPL of a PEM fuel cell on the water management and performance: A neutron radiography investigation**; ECS Transactions, vol. 92, no. 8, pp. 135-146, July 2019; <https://doi.org/10.1149/09208.0135ecst>
- / Kessler F., Hariskos D., Spiering S., Lotter E., Würz R., Huber H. (HS München); **CIGS thin film photovoltaic – approaches and challenges**; in: High-Efficient Low-Cost Photovoltaics, Springer Verlag, 2019; <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22864-4>
- / Kogler W., Schnabel T., Ahlswede E., Powalla M.; **Study on formation and characterization of CZTSSe-based absorber layer stack from a green solution based approach**; Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 200, 15 Sept. 2019, 109959; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109959>
- / Kottam P., Kalkan D., Wohlfahrt-Mehrens M., Marinaro M.; **Influence of Li-salt concentration on redox potential of lithium metal and electro-chemistry of ferrocene in DMSO-based electrolytes**; Journal of the Electrochemical Society, 166 (8) A1574-A1579 (2019); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0881908jes>
- / Kremer L., Hoffmann A., Danner T., Hein S. (DLR), Prifling B. (Univ. Ulm), Westhoff D. (Univ. Ulm), Dreer C., Latz A. (DLR), Schmidt V. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Manufacturing process for improved ultra-thick cathodes in high-energy lithium-ion batteries**; Energy Technology, 17 April 2019, 1900167; <https://doi.org/10.1002/ente.201900167>
- / Künzel M. (HIU), Bresser D. (HIU), Kim, G.-T. (HIU), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M., Passerini S. (HIU); **Unveiling and amplifying the benefits of carbon-coated aluminium current collectors for sustainable LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ cathodes**; ACS Applied Energy Materials, 2019; <http://dx.doi.org/10.1021/acsaem.9b01302>
- / Künzel M. (HIU), Porhiel R. (HIU), Bresser D. (HIU), Asenbauer J. (HIU), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M., Passerini S. (HIU); **Deriving structure-performance relations of chemically modified chitosan binders for sustainable high-voltage LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ cathodes**; Batteries & Supercaps 2019, 2, 1-11; <http://dx.doi.org/10.1002/batt.201900140>
- / Löschel A. (Univ. Münster), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F., Ziesing H.-J. (AGEB); **Expertenkommission zum Monitoring-Prozess "Energie der Zukunft": Stellungnahme zum zweiten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2017**; Berlin, Münster, Stuttgart, Mai 2019; www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/monitoring-prozess.html
- / Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Böll J. (HZB), Alrwashdeh S. (HZB), Hilger A. (HZB), Klages M., Haussmann J., Scholta J.; **Morphology correction technique for tomographic in-situ and operando studies in energy research**; Journal of Power Sources, Volume 414, 28 February 2019, Pages 8-12; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.12.072>
- / Meyer O. (TU Dortmund), Weihs C. (TU Dortmund), Mähr S., Tran H.Y., Kirchhof M. (TU Dortmund), Schnackenberg S. (TU Dortmund), Neuhaus-Stern I. (TU Dortmund), Rößler S., Braunwarth W.; **Development of implementation of statistical methods for quality optimization in the large-format lithium-ion cells production**; Energy Technology, 16 April 2019, 19000244; <http://dx.doi.org/10.1002/ente.201900244>
- / Mohseninia A., Kartouzian D., Eppler M., Langner P., Markötter H. (HZB), Wilhelm F., Scholta J., Manke I. (HZB); **Influence of structural modification of micro-porous layer and catalyst layer on performance and water management of PEM fuel cells: Hydrophobicity and perforation**; Fuel Cells - From Fundamentals to Systems, Special Issue, 2019
- / Müller V., Scurtu R.-G., Memm M., Danzer M. (Univ. Bayreuth), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Study of the influence of mechanical pressure on the performance and aging of lithium-ion battery cells**; Journal of Power Sources, Volume 440, 15 Nov. 2019, 227148; <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227148>
- / Müller V., Scurtu R.-G., Richter K., Waldmann T., Memm M., Danzer M. (Univ. Bayreuth), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Effects of mechanical compression on the aging and the expansion behaviour of Si-C-composite / NMC811 in different lithium-ion battery cell formats**; Journal of the Electrochemical Society, 166 (15) A3796-A3805 (2019); <http://dx.doi.org/10.1149/2.1121915jes>
- / Penga Ž. (UoS) Bergbreiter C., Barbir F. (UoS), Scholta J.; **Numerical and experimental analysis of liquid water distribution in PEM fuel cells**; Energy Conversion and Management, Volume 189, 1 June 2019, Pages 167-183; <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.082>

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

- / Pournemat A., Wilhelm F., Scholta J.; **Effect of current density on the dynamical evolution of liquid water distribution within the gas diffusion layers of PEMFC employing a multi-timescale kinetic Monte Carlo method**; Journal of The Electrochemical Society, 166 (4) F334-F342 (2019); <https://doi.org/10.1149/2.0981904jes>
- / Richter K., Waldmann T., Kasper M., Pfeifer C., Memm M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Surface film formation and dissolution in Si/C anodes of Li-ion batteries - A glow discharge optical emission spectroscopy depth profiling study**; Journal of Physical Chemistry, C 2019, 123, 31, 18795-18803; <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03873>
- / Salomon O., Hempel W., Kiowski O., Lotter E., Witte W., Ferati A. (NICE), Schneikart A. (NICE), Kaune G. (NICE), Schäffler R. (NICE), Becker M. (NMI), Vidal R. (IES), Mücke D. (TH Ulm), Walter T. (TH Ulm); **Influence of the molybdenum back contact on the PID effect for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; Coatings 2019, 9, 794; <http://dx.doi.org/10.3390/coatings9120794>
- / Schill W.-P. (DIW), Diekmann J. (DIW), Püttner A.; **Sechster Bundesländervergleich erneuerbare Energien: Schleswig-Holstein und Baden-Württemberg an der Spitze**; DIW Wochenbericht 48/2019, Berlin, 27.11.2019
- / Schultes M., Helder T., Ahlswede E., Aygüler M., Jackson P., Paetel S., Schwenzler J. (KIT), Hossain I. (KIT), Paetzold U. (KIT), Powalla M.; **Sputtered transparent electrodes (IO:H and IZO) with low parasitic near-infrared absorption for perovskite-Cu(In,Ga)Se₂ tandem solar cells**; ACS Appl. Energy Mater. 2019, 2, 11, 7823-7831; <https://doi.org/10.1021/acsaem.9b01224>
- / Staiß F., Schmidt M., Hufendiek K. (Univ. Stuttgart), Schick C. (Univ. Stuttgart); **Kopernikus-Projekt Enavi – Navigationssystem für eine nachhaltige Energiewende**; In: Internationaler ETG-Kongress 2019 - Das Gesamtsystem im Fokus der Energiewende, Esslingen am Neckar, 8./9.5.2019, Tagungsband
- / Westhoff D. (Univ. Ulm), Danner T. (HIU), Hein S. (HIU), Scurtu R., Kremer L., Hoffmann A., Hilger A. (HZB), Manke I. (HZB), Wohlfahrt-Mehrens M., Latz A. (HIU), Schmidt V. (Univ. Ulm); **Analysis of microstructural effects in multi-layer lithium-ion battery cathodes**; Materials Characterization 151 (2019), 166-174; <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2019.02.031>
- / Zuberbühler U.; **CORAL – CO₂-Rohstoff aus Luft: Entwicklung eines hocheffizienten Verfahrens zur CO₂-Bereitstellung aus Luft als Basis für die Erzeugung regenerativer Rohstoffe**; in: FONA/BMBF-Broschüre „CO₂Plus – Stoffliche Nutzung von CO₂ zur Verbreiterung der Rohstoffbasis, Abschlussergebnisse“, Sept. 2019; http://www.chemieundco2.de/uploads/CO2plus_Abschlussergebnisse.pdf
- / Abdellatif A., Axmann P., Jobst N., Scurtu R., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Gas evolution in high voltage lithium-ion batteries: online mass spectrometric studies**; Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications – ABAA 2019, Ulm, 6-9 Oct. 2019
- / Ahlswede E., Docampo P. (Newcastle Univ.), Hartschuh A. (LMU), Hetterich M. (KIT), Schultes M., Wahl T., Hanisch J., Wessendorf C., Helder T., Giesbrecht N. (LMU), Aygüler M., Ciesielski R. (LMU), Ruf F. (KIT); **A journey from perovskite to tandem solar cells with CIGS bottom cells**; 5th International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics, Lausanne, 30 Sept. - 2 Oct. 2019
- / Becher D., Bauer M., Frieß B. (Mercedes-Benz), Döring H.; **Experimental investigation of reaction and temperature behaviour of large lithium-ion cells during thermal propagation**; Kraftwerk Batterie, Aachen, 3-4 April 2019; <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12185.06247>
- / Becher D., Böse O., Trischler S., Döring H., Frieß B. (Mercedes-Benz); **Initialization of thermal runaway in lithium-ion batteries and measures to prevent thermal propagation**; AABC Europe – Advanced Automotive Battery Conference 2019, Strasbourg, 27-31 Jan. 2019; <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24771.45600>
- / Becher D., Böse O., Trischler S., Döring H., Frieß B. (Mercedes-Benz); **Thermal Runaway und Propagationsverzögerung in Lithium-Ionen-Zellmodulen**; Konsense-Tagung, Technische Hochschule Ingolstadt, 19.9.2019
- / Becher D., Groß A., Menz F., Hoffmann M. (ErlingKlinger), Döring H., Bauer M.; **Experimental analysis of different heat paths during thermal propagation in lithium-ion battery packs**; Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications – ABAA 2019, Ulm, 6-9 Oct. 2019; <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.13256.06409>
- / Becker J.-P., Menner R.; **Hydrogen doped indium oxide films as transparent front contacts for CIGS solar cells**; Transparent Conductive Oxides – Fundamentals and Applications – TCO 2019, Leipzig, 23-27 Sept. 2019
- / Brellocks J.; **Kombination von Biomassefeuerungsanlagen mit Power-to-X-Prozessen**; 3. VDI-Fachkonferenz Betrieb und Optimierung von Biomasseverbrennungsanlagen, Aalen, 7.-8.5.2019
- / Brellocks J., Dürrbeck M., Marquard-Möllenstedt T., Spieth P., Thaler S., Specht M.; **Kombination von Oxyfuel-Prozess und Hochtemperatur-elektrolyse zur Synthesegaserzeugung mit signifikant reduziertem Elektrolysestrombedarf**; DGMK-Fachbereichstagung Thermochemische Konversion: Schlüsselbaustein für zukünftige Energie- und Rohstoffsysteme, Dresden, 23.-24.5.2019
- / Brinner A., Löffler M.-S.; **Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg**; SORENERGY 2019, Offenburg, 13.-14.11.2019
- / Brinner A., Löffler M.-S., Jörissen L., Friedrich A. (DLR), Carmo M. (FZJ), Müller M. (FZJ), Smolinka T. (ISE), Weber A. (KIT), Harnisch F. (UFZ); **Von der Elektrolyse zur Brennstoffzelle – Der Wasserstoffpfad im Energiesystem der Zukunft**; FVEE-Jahrestagung 2019: Energy Research for Future – Forschung für die Herausforderungen der Energiewende, Berlin, 22.-23.10.2019

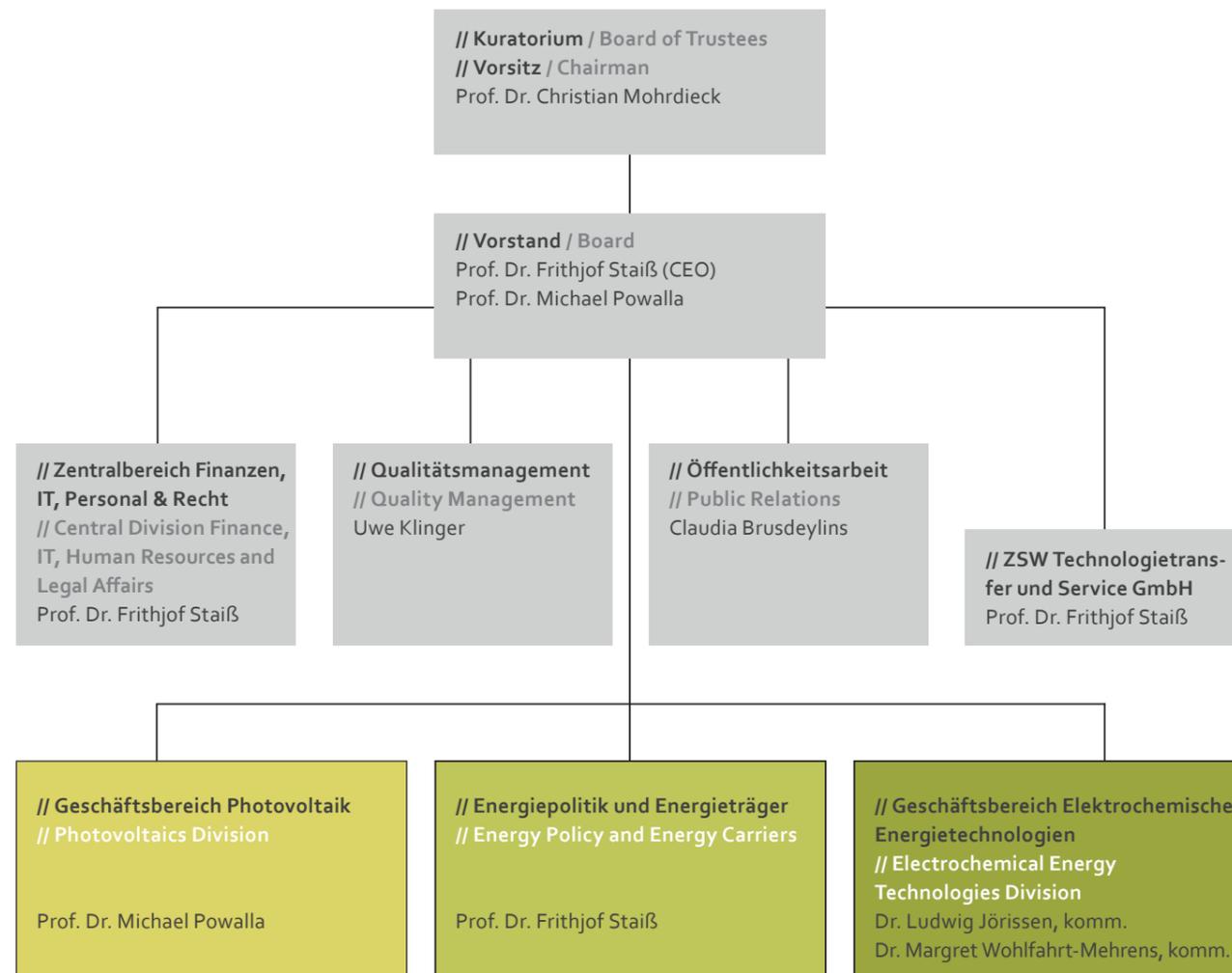
// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications

- / Buchmann T., Wolf P.; **Dynamics in European research networks – A network analysis of European automotive research projects**; 5th International Conference on Computational Social Science, Amsterdam, 17-20 July 2019
- / Buchmann T., Wolf P., Fidaschek S.; **Stimulating e-mobility diffusion in Germany: An agent-based simulation approach**; Social Stimulation Conference 2019, Mainz, 23-27 Sept. 2019
- / Fuchs B., Asante J., Böse O., Jörissen L.; **Exploring the threefold specific energy in activated carbons**; 36th International Battery Seminar & Exhibit, Fort Lauderdale, 25-28 March 2019
- / Geyer D., Lechner P., Stellbogen D., Hummel S.; **Systemtechnik für PV-Fasaden mit Dünnschichtmodulen**; Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik, Bad Staffelstein, 18.-19.3.2019
- / Geyer D., Stellbogen D., Lechner P., Hummel S., Schnepf J., Huschenhöfer D.; **Analysis and investigation of BIPV operating performance based on the PV installations at the ZSW research building**; 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Marseille, 9-13 Sept. 2019
- / Hariskos D., Witte W., Jackson P., Paetel S., Wischmann W., Powalla M.; **Chemical aspects on the p-n junction formation in CIGS-based solar cells**; 47th IUPAC World Chemistry Congress - IUPAC 2019, Paris, 7-12 July 2019
- / Heider E., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Production process for overcoming the limited rate capability of ultra-thick electrodes for LIB; IBPC – International Battery Production Conference, Braunschweig, 4-6 Nov. 2019**
- / Helder T., Schultes M., Powalla M., Menner R., Ahlswede E.; **Hydrogenated indium oxide IO:H for semitransparent perovskite cells**; 11th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics - HOPV 2019, Roma, 12-15 May 2019
- / Hempel W., Hanisch J., Magorian-Friedlmeier T.; **Diffusion of CIGS elements into Mo back contact measured by ToF-SIMS**; 18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, Dresden, 15-20 Sept. 2019
- / Hoffmann A., Axmann P., Gabrielli G., Zink S., Jobst N., Heider E., Dreer C., Pfeifer C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Lithium-Ionen-Batterien: Vom Pulver zur Zelle**; Technical Days 2019, Hanau, 24-25 Sept. 2019
- / Hoffmann A., Jobst N., Dreer C., Klein A., Gabrielli G., Heider E., Pfeifer C., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Dispersion and coating strategies for innovative electrodes for LIB; Kraftwerk Batterie, Aachen, 3-4 April 2019**
- / Hundhausen M., Anger J., Haizmann F., Rettenmeier A.; **Synchronized multi-lidar measurements in complex terrain and comparison with a met mast; IEA Wind Task 32 Lidar General Meeting, Risø Campus, Roskilde, 13 Dec. 2019**
- / Hünig R., Hempel W., Friedlmeier T., Paetel S.; **Investigations of accelerated in-line CIGS co-evaporation**; 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Marseille, 9-13 Sept. 2019
- / Huschenhöfer D., Mieser J., Binder J.; **PV-Eigendeckung eines Haushalts mit Elektroauto - Einfluss von Ladeverhalten und Nutzung eines lokalen Speichers**; 34. PV-Symposium, Bad Staffelstein, 19.-21.3.2019
- / Keppeler M., Heduschka R., Staude A. (Thermo Fisher Scientific), Braunwarth W.; **Towards safer application of lithium-ion batteries – Production-induced defect recognition through computed tomography**; Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications - ABAA 2019, Ulm, 6-9 Oct. 2019
- / Kessler F., Spiering S., Salomon O., Würz R.; **CIGS device processing on insulated (stainless) steel foils**; 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Marseille, 9-13 Sept. 2019
- / Küffner J., Wahl T., Hanisch J., Hempel W., Ahlswede E., Powalla M.; **Blade coating perovskite solar cells: Impacts of surfactant in absorber layer**; 11th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics – HOPV 2019, Roma, 12-15 May 2019
- / Lechner P., Wirth H., Hummel S., Schnepf J., Geyer D., Weinreich B. (HaWe), Haas R. (HaWe); **Analysis of fielded PV-modules with backsheet issues**; 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Marseille, 9-13 Sept. 2019
- / Löffler M.-S.; **Wasserstoff und regenerativ erzeugtes Gas – aktuelle Entwicklungen**; Smart Grids-Gespräche 2019, Stuttgart, 4.11.2019
- / Löffler M.-S., Fuchs A.-L., Schwarz S.; **Power-2-Gas: Die Bedeutung strom-basierter Wasserstoffs für das Land Baden-Württemberg**; GasPerspektive Baden-Württemberg - Branchendialog 2019, Stuttgart, 9.4.2019
- / Mähr S., Sehne F., Tran H. Y., Rößler S., Braunwarth W.; **Data tracking and monitoring of PHEV₁ lithium-ion batteries from slurry up to cell level**; Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications – ABAA 2019, Ulm 6-9 Oct. 2019
- / Mancini M., Martin J., Ruggeri I., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Spheroidized graphite for LIBs applications: physicochemical and electrochemical characterization**; 7th German-Japanese Symposium „Development and Technology of Carbon Materials“, Würzburg, 24 Sept. 2019
- / Matthiss B., Erb J., Binder J.; **Meter placement for state estimation in distribution grids**; International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, Porto, 9-11 Sept. 2019
- / Matthiss B., Momenifarhani A., Binder J.; **Storage placement and sizing in a distribution grid with high PV generation**; 2019 IEEE Conference on Environment and Electrical Engineering and I&CPS Europe, Genua, 10-14 June 2019
- / Menz F., Becher D., Döring H., Bauer M.; **Thermal characterization of barrier materials with enhanced endothermal reactivity for the prevention of thermal propagation in lithium-ion battery packs**; Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications – ABAA 2019, Ulm, 6-9 Oct. 2019; <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32305.74084>
- / Mohanta P.; **Catalyst layer: looking at material trends**; Canada-Germany Workshop, Freiburg, 12 Sept. 2019
- / Mohanta P., Ripa M., Regnet F., Jörissen L.; **Dependency of membrane types, catalyst layer thickness and ionomer contents on MEA performances of PEMFC**; FDFC2019 Conference, Nantes, 12-14 Feb. 2019
- / Mohanta P., Ripa M., Yazili D., Regnet F., Jörissen L.; **Effects of catalyst support materials and ionomer amounts in the cathode catalyst layers on MEA performance at high current loads**; EFC 2019 Conference, Naples, 9-11 Dec. 2019
- / Mohseninia A., Kartouzian D., Markötter H. (HZB), Wilhelm F., Scholta J., Manke I. (HZB); **Tailored catalyst layer and micro-porous layer porosity and the effect on the performance and water content in PEMFC**; 8th European Fuel Cell Technology & Applications, Piero Lunghi Conference – EFC 2019, Naples, 9-11 Dec. 2019
- / Morkunaite A., Schnabel T., Wessendorf C., Schultes M., Helder T., Ahlswede E.; **Thermal and moisture stability of methylammonium lead iodide-based perovskite solar cells**; nanoGe International Conference on Perovskite Solar Cells, Photonics and Optoelectronics (NIPHO), Jerusalem, 25-27 Feb. 2019
- / Rettenmeier A., Haizmann F., Anger J., Musiol F., Schmidt M.; **Das Wind-ForS-Forschungsfeld in bergig-komplexem Gelände**; Meteorologen-Tagung DACH, Garmisch-Partenkirchen, 18.-22.3.2019
- / Rongstock R., Pfeiffer D. (HS Biberach), Becker M. (HS Biberach), Toradmal A. (HS Reutlingen), Thomas B. (HS Reutlingen), Widman C. (HS Reutlingen), Frank H. (HS Heilbronn); **Energiemanagement von Quartieren und Energiezellen: Ein zweistufiger Optimierungsansatz**; 7. VDI-Fachtagung: Energiesysteme für Quartiere und Gebäude, Nürnberg, 23.10.2019
- / Rößler S., Tran H. Y., Braunwarth W.; **Scaling up new materials to mass cell production - Challenges, experience and process solutions**; International Battery Production Conference IBPC, Braunschweig, 4 Nov 2019
- / Salomon O., Hempel W., Kiowski O., Lotter E., Witte W., Ferati A. (NICE), Schneikart A. (NICE), Kaune G. (NICE), Schäffler R. (NICE), Mücke D. (TH Ulm), Vidal R. (TH Ulm), Walter T. (TH Ulm); **Increased PID immunity of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Marseille, 9-13 Sept. 2019
- / Schmidt M.; **Sektorenkopplung jenseits von all-electric – Schlüsseltechnologie Elektrolyse?!**; 12. Eberbacher Klostersgespräche zu ökonomischen Grundsatzfragen der Transformation des Energiesystems, Eltville, 18.11.2019
- / Schmidt M.; **Potenziale von Wasserstoff für die Dekarbonisierung des Verkehrsbereichs**; Fachgespräch der Bundestagsfraktion von Bündnis 90/DIE GRÜNEN: E-Fuels, Wasserstoff, Biosprit: Wo können alternative Kraftstoffe die Elektromobilität ergänzen?, Berlin, 13.12.2019
- / Schnabel T., Busch L., Schultes M., Vocht M. (DITF), von Metzen R. (NMI), Körte F. (NMI), Hartmann H. (NMI), Völker M. (FEM); **Attempts to prevent lead elution from encapsulated perovskite solar cells**; 5th International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics, Lausanne, 30 Sept. - 2 Oct. 2019
- / Schneider L., Felder M., Kaifel A.; **Using COSMO-D2 data for high-resolution WRF offshore wind farm simulations**; EMS Annual Meeting 2019, Lyngby, 9-13 Sept. 2019
- / Schultes M., Helder T., Ahlswede E., Jackson P., Powalla M.; **Minimizing parasitic near infrared absorption in perovskite-CIGS tandem solar cells**; 5th International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics, Lausanne, 30 Sept.-2 Oct. 2019
- / Staiß F., Kienzlen V. (KEA); **10 Jahre bis 2030 – Wie nehmen wir die Menschen bei der Energiewende mit?; Energiepolitisches Forum ZSW, Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg, Stuttgart, 4.6.2019**
- / Stellbogen D., Lechner P., Schanz O., Hummel S., Schnepf J., Kaiser M. (Canadian Solar EMEA); **Wirkung wechselnder mechanischer Belastungen auf Photovoltaik-Module**; 34. PV-Symposium, Bad Staffelstein, 19.-21.3.2019
- / Tran H. Y.; **Validation of laboratory process improvements for the industrial production of Li-ion cells**; Advanced Lithium Batteries for Automotive Applications – ABAA 2019, Ulm 6-9 Oct. 2019
- / Tran H. Y., Rößler S., Braunwarth W.; **Impact of the cathode compression of the electrode quality for large-scale format PHEV₁ cells**; International Battery Production Conference IBPC, Braunschweig, 4 Nov 2019
- / Valter V., Jenne M., Schlumberger G., Spitta C. (ZBT), Witzany R. (ZBT), Kvasnicka A. (ZBT); **Establishment of two independent hydrogen quality laboratories**; EFCF 2019 - Low-Temperature Fuel Cells, Electrolysers & H₂ Processing, Luzern, 2-5 July 2019
- / Waldmann T., Quinn J., Richter K., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Specific influences and general trends in Li-ion cells - Electrode parameters, cell format, and fast charging capability**; 236th ECS-Meeting, Atlanta, 13-17 Oct. 2019
- / Wenske J., Frey M., Bickel B., Binder J.; **Charging of company fleets – power requirement and flexibility based on the mapping of conventional car usage to BEVs**; 3rd E-Mobility Power System Integration Symposium, Dublin, 14 Oct. 2019
- / Wenske J., Kolbe K.; **„Ihr Beitrag zur Mobilitätswende – Köpfchen statt nur Kupfer“ Ergebnisse der ZSW-Umfrage bei Electrify BW e. V.**; DLR-Institutskolloquium, Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, 30.7.2019
- / Witte W.; **Approaches to improve CIGS thin-film solar cells**; 11th International Conference on Advanced Materials and Devices ICAMD 2019, Jeju, 10-13 Dec. 2019
- / Witte W., Hariskos D., Kiowski O., Paetel S., Maiberg M. (Univ. Halle-Wittenberg), Zahedi-Azad S. (Univ. Halle-Wittenberg), Pistor P. (Univ. Halle-Wittenberg), Scheer R. (Univ. Halle-Wittenberg), Hauschild D. (KIT), van Maris V. (KIT), Weinhardt L. (KIT), Heske C. (KIT), Keutgen J. (RWTH), Cojocar-Mirédin O. (RWTH), Ghorbani E. (TUD), Albe K. (TUD), Jin X. (KIT), Schneider R. (KIT), Gerthsen D. (KIT), Nikolaeva A. (HZB), Marquez-Prieto J. (HZB), Krause M. (HZB), Schäfer S. (HZB), Hages C. (HZB), Abou-Ras D. (HZB), Unold T. (HZB), Mainz R. (HZB), Seeger J. (KIT), Hetterich M. (KIT), Eraerds P. (Avancis), Niesen T. (Avancis), Dalibor T. (Avancis), Palm J. (Avancis), Schweiger M. (NICE), Dimmler B. (NICE), Hunger R. (Solibro), Henke T. (Solibro), Kratzert P. (Solibro), Powalla M.; **Characterization of high bandgap CIGS solar cells and corresponding absorber/buffer interfaces: Results of the EFFCIS project**; 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC), Marseille, 9-13 Sept. 2019
- / Witte W., Hempel W., van Maris V. (KIT), Hauschild D. (KIT), Weinhardt L. (KIT), Heske C. (KIT), Jin X. (KIT), Schneider R. (KIT), Gerthsen D. (KIT), Hariskos D.; **In_x(O,S)₂ buffer layers for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; Nanotechnology and Next Generation High Efficiency Photovoltaics – NEXTGEN 2019, Palma de Mallorca, 1-4 Oct. 2019
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **Process development and quality control for manufacturing of lithium-ion batteries**; 236th ECS-Meeting, Atlanta, 13-17 Oct. 2019
- / Yoon D., Gabrielli G., Gauckler C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Silicon/carbon composite and prelithiated composite for S-Si batteries**; German-Israeli Battery School, Berlin, 12-16 May 2019
- / Zaubitzer S., Kottam P., Jörissen L., Wohlfahrt-Mehrens M., Marinaro M.; **Metall-Sauerstoff-Batterien als Energiespeicher der Zukunft**; Energie-Campus 2019 der Stiftung Energie & Klimaschutz, Energie und Umwelt - Meine Idee für morgen, Karlsruhe, 15.11.2019
- / Zillner J., Wessendorf C., Ahlswede E., Powalla M., Hanisch J.; **Lead-free Bi-based perovskite solar cells: Morphology optimization and band-gap tuning**; nanoGe International Conference on Perovskite Solar Cells, Photonics and Optoelectronics (NIPHO), Jerusalem, 25-27 Feb. 2019
- / Zink S., Heider E., Hoffmann A., Jobst N., Axmann P., Dreer C., Pfeifer C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Key features in the manufacturing process of blend electrodes for high energy lithium ion batteries**; 235th ECS-Meeting, Dallas, 26-31 May 2019

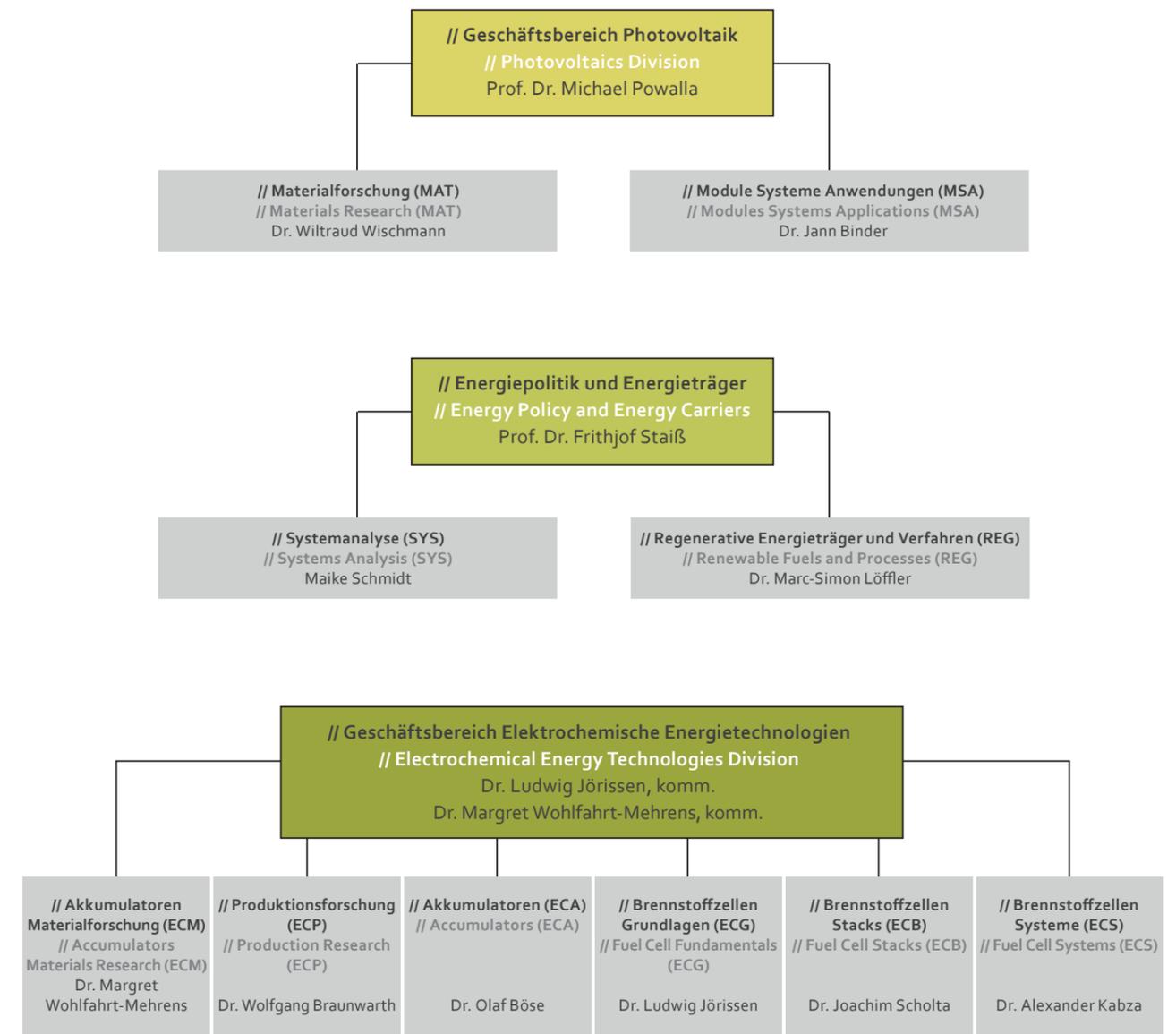
// Organigramme

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

// FIRMEN, INSTITUTE, INSTITUTIONEN

// COMPANIES, INSTITUTES, INSTITUTIONS

ABAA	Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications
ACS	American Chemical Society
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
AIT	Austrian Institute of Technology
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung / German Federal Ministry of Education and Research
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie / German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy
BW	Baden-Württemberg
CELEST	Center for Electrochemical Storage Ulm & Karlsruhe
CEP	Clean Energy Partnership
CERTH	Centre for Research and Technology Hellas
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DITF	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
ECS	Electrochemical Society
EMS	European Meteorological Society
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility
ETG	Energetische Gesellschaft im VDE
FEM	Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie
FONA	Forschung für Nachhaltige Entwicklung – Rahmenprogramm des BMBF
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
HIU	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
HS	Hochschule
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IALB	International Automotive Lithium Battery Association
IEA	International Energy Agency
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IES	Institute for Environment and Sustainability
ISE	International Society of Electrochemistry
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
KEA	Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH
KIT	Karlsruher Institut für Technologie / Karlsruhe Institute of Technology
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität
NMI	Naturwissenschaftliches und Medizinisches Institut
POLiS	Post Lithium Storage
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SAE	Society of Automotive Engineers
TH	Technische Hochschule
TU	Technische Universität
TÜBITAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (Türkische Anstalt für Wissenschaftliche und Technologische Forschung)
TUD	Technical University of Denmark
UFZ	Helmholtzzentrum für Umweltforschung GmbH
UniMiB	Università degli Studi di Milano Bicocca
UNSW	University of New South Wales
UoS	University of Split
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VUB	Vrije Universiteit Brussel

WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süd
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH
Zirius	Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung Universität Stuttgart

// TECHNISCHE BEGRIFFE

// TECHNICAL TERMS

AC	Wechselstrom / Alternating Current
AEL	Alkalische Druckelektrolyse / Alkaline Pressure Electrolysis
AI	Artificial Intelligence
AST	Beschleunigter Stresstest / Accelerated Stress Test
BEV	Batteriefahrzeug / Battery Electric Vehicle
BPP	Bipolarplatte / Bipolar Plate
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
DC	Gleichstrom / Direct Current
DMSO	Dimethylsulfoxid
DOI	Digitaler Objektbezeichner / Digital Object Identifier
DWL	Doppler Wind LiDAR
EIS	Electrochemical Impedance Spectroscopy
F&E	Forschung und Entwicklung
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug / Fuel Cell Electric Vehicle
FIB	Focussed Ion Beam
GDE	Gasdiffusionselektrode / Gas Diffusion Electrode
GDL	Gasverteilerschicht / Gas Diffusion Layer
GD-OES	Optische Glimmentladungsspektroskopie / Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy
GGI	Verhältnis der atomaren Konzentration von Gallium zur Summe der Konzentrationen von Gallium und Indium
HRS	Wasserstoff-Tankstelle / Hydrogen Refueling Station
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
LIB	Lithium-Ionen-Batterie / Lithium-Ion Battery
MD	Maschinenrichtung / Machine Direction
MEA	Membran-Elektroden-Einheit / Membrane Electrode Assembly
ML	Maschinelles Lernen / Machine Learning
MPL	Mikroporöse Schicht / Micro Porous Layer
nRMSE	normierter mittlerer quadratischer Fehler / normalised Root Mean Square Error
OER	Sauerstoffentwicklung / Oxygen Evolution Reaction
ORR	Sauerstoffreduktion / Oxygen Reduction Reaction
P2G	Power-to-Gas
P2X	Power-to-X
PEM	Proton-Exchange Membrane
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran / Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle / Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PID	Potenzialinduzierte Degradation / Potential-Induced Degradation
PtG	Power-to-Gas
PtX	Power-to-X
PV	Photovoltaik / Photovoltaics
R&D	Research and Development
R2R	Rolle zu Rolle / Roll to Roll
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SEM	Scanning Electron Microscope
SIMS	Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie / Secondary Ion Mass Spectrometry
SME	Small and Medium-sized Enterprises
SOE	Hochtemperaturelektrolyse / Solid Oxide Electrolysis
TD	Transversale Richtung / Transverse Direction
ToF	Time of Flight
WRF	Weather Research and Forecasting

// Mitgliedschaften
// ZSW is a member of



AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
AKK	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
Allianz BIPV	Allianz Bauwerkintegrierte Photovoltaik e. V.
BVES	Bundesverband Energiespeicher e. V.
Cluster BZ BW	Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg
CPN	Clean Power Net
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DPP	Deutsche Phosphor-Plattform e. V.
DWV	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V.
ECS	Electrochemical Society
EERA	European Energy Research Alliance
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.
EUREC	European Renewable Energy Centres Agency
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
Hydrogen Europe	Hydrogen Europe Research
KLIB	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien e. V.
PEE BW	Plattform Erneuerbare Energien Baden-Württemberg
performing energy	Fachkommission des DWV e. V. Power-to-Fuel
SmartGridsBW	SmartGrids-Plattform Baden-Württemberg e. V.
SolarCluster	Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
Strategieplattform Power to GAS	(Deutsche Energieagentur)
STRise	Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy
UNW	Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e. V.
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDMA	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süd

// 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