

---

// Ergebnisse  
Results

# 2016

---

# ZSW

---

# // Inhalt

## Contents

---

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / Our Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	<b>Erfolge 2016 / Achievements 2016</b>
14	<b>Schwerpunktbericht / Focus Report</b>
	Mobilität der Zukunft
	Mobility of the Future
30	<b>Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects</b>
32	Systemanalyse / Systems Analysis
36	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
40	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
44	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
48	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
52	Produktionsforschung / Production Research
54	Akkumulatoren / Accumulators
58	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
62	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
66	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
68	<b>Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations</b>
78	<b>Dokumentation / Documentation</b>
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 / Imprint

### // Copyright

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

### // Copyright

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

## // Vorwort

Das Jahr 2016 stellt eine wichtige Wegmarke für die Elektromobilität dar. Abgasskandal und drohende Fahrverbote für Dieselfahrzeuge auf der einen Seite, Prämien für den Kauf von Elektrofahrzeugen sowie der Ausbau der Ladeinfrastruktur auf der anderen Seite haben der Elektromobilität in Deutschland starke Impulse gegeben. Und längst geben die Hersteller weltweit nicht mehr nur Gas, sondern auch „Strom“: Im Jahr 2017 werden voraussichtlich mehr als eine Million Elektrofahrzeuge produziert.

Für uns ist das der Anlass, den Schwerpunkt unseres Jahresberichts auf die Mobilität der Zukunft zu legen. Mit unserer Kompetenz in Produktionsverfahren für Lithium-Ionen-Batterien und mit unserer Forschungsproduktionsplattform, die einzigartige Möglichkeiten bietet, wollen wir den Aufbau einer Zellenproduktion in Deutschland als zentrales Element der Wertschöpfungskette unterstützen. Gleichzeitig erforschen und entwickeln wir Batterien der nächsten und übernächsten Generation. Analog arbeiten wir an der zweiten Schlüsseltechnologie für die Elektromobilität: der Brennstoffzelle. Dabei reicht unser Gesamtkonzept von der Bereitstellung des Wasserstoffs bis zur Qualitätssicherung der Tankstellen. Und schließlich geht es uns um die intelligente Kopplung der Elektromobilität mit dem Energiesystem und die Begleitung struktureller Anpassungsprozesse.

Der Bericht präsentiert darüber hinaus weitere wissenschaftliche Highlights aus dem ZSW. Dazu zählen Dünnschicht-Solarzellen mit höchster Effizienz und der Aufbau des weltweit ersten Windtestfeldes in bergig-komplexem Gelände, das wir mit dem Windenergie-Forschungscluster Süd (WindForS) und in enger Kooperation mit internationalen Partnern realisieren wollen.

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

The year 2016 represents an important milestone in the history of electromobility. In Germany, e-mobility has received a significant boost from the emissions scandal and the imminent prohibition of diesel vehicles on the one hand and premiums on electric vehicle purchases and expansion of the charging infrastructure on the other. Across the globe, the automotive industry is “powering up” their portfolio with electric vehicles. In 2017, production of electric vehicles is expected to exceed the one million mark.

We are using this development as an opportunity to focus on mobility of the future in our annual report. Based on our expertise in the field of lithium-ion battery production and our unique research production platform, we are promoting the establishment of a cell production industry in Germany as a central element in the value added chain. At the same time, we are researching and developing batteries of the next and following generations. In parallel, we are working on the second key e-mobility technology: the fuel cell. Our comprehensive concept stretches from the provision of hydrogen to quality assurance at fuelling stations. And finally, we are working on the smart interfacing of e-mobility and the energy system as well as supporting structural adjustment processes.

The report also presents further scientific highlights developed at ZSW. Among them are thin-film solar cells with world-record efficiency levels and the establishment of the world’s first wind test field in a complex mountainous terrain which we will be setting up in conjunction with Windenergie-Forschungscluster Süd (WindForS) and in close cooperation with international partners.

We are pleased with the continuing great interest in our work, which we experience in many discussions and intensive media coverage. This is owed to all of our employees who, first and foremost, the Board would like to thank for their outstanding commitment. In particular, we would also like to thank the members of the Board of Trustees and its Chairman, Prof. Christian Mohrdieck. We would also like to thank the Federal State of Baden-Württemberg for its financial support and excellent cooperation and our partners from companies, public research funding and science.

We hope you enjoy reading the ZSW Annual Report!



// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Michael Powalla

## // Leitbild des ZSW

### // Energie mit Zukunft

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

### // Wissenschaft mit klarem Fokus

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

### // Technologietransfer schafft Arbeitsplätze

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

### // Qualität für unsere Kunden

Die Zufriedenheit unserer Kunden hat oberste Priorität. Als unabhängiges Institut reagieren wir schnell und flexibel. Die Qualität unserer Leistungen, Budget- und Termintreue sowie der Umgang mit Vertraulichkeit stimmen. Dazu trägt auch unser zertifiziertes Qualitätsmanagement bei.

### // Motiviert im Team

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

### // Dem Ganzen verpflichtet

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

### // Akteure neutral informieren

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

## // Our Mission

### // 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 a natural gas substitutes) and battery and fuel cell technologies; our analyses cover the economics of energy systems.

### // Science is our power

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

### // Innovation is our strength

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

### // Quality is our watchword

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

### // Teamwork is our bond

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

### // The environment is our concern

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

### // Knowledge is our force

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

## // Stiftung

## // Foundation

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

### Stiftungsauftrag:

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

### Stifter des ZSW / The founders are

#### Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

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

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

### The goal of the foundation is:

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

### Unternehmen / Commercial enterprises

- > Aare-Tessin AG für Elektrizität
- > Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Daimler AG
- > EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- > Fichtner GmbH & Co. KG
- > IN-TEC GmbH
- > Martin Fritz Marketing Kommunikation GmbH
- > Messer GmbH
- > Robert Bosch GmbH
- > Schlaich Bergermann und Partner
- > Telefunken Electronic GmbH
- > Verband 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
- > Ministerialrätin Dr. Karin Freier, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
- > Ministerialdirigent Karl Greißing, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg
- > Regierungsdirektor Dr. Christoph Rövekamp, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- > Dr.-Ing. Klaus Bonhoff, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
- > Prof. Dr. Uwe Leprich, Umweltbundesamt

### 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. Eicke Weber, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

### Wissenschaft / Science

- > Prof. Dr. Michael Auer, Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung
- > Prof. Dr. habil. Ursula Eicker, Hochschule für Technik Stuttgart
- > Prof. Dr. Angelika Heinzl, Universität Duisburg-Essen
- > Prof. Dr. Uli Lemmer, Karlsruher Institut für Technologie
- > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

### Wirtschaft / Commercial enterprises

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



//Erfolge 2016

// Achievements 2016

## // Erfolge 2016

## // Achievements 2016

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, effizienter mit Energie umzugehen und den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen, um dadurch zu einer nachhaltigen Energieversorgung beizutragen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch die Entwicklung neuer und verbesserter Energietechnologien und ihren Transfer in den Markt.

Auch 2016 wurden wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

“Energy with a future” describes the goal to spend energy efficiently, thereby increasing the share of renewable energy generation 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.

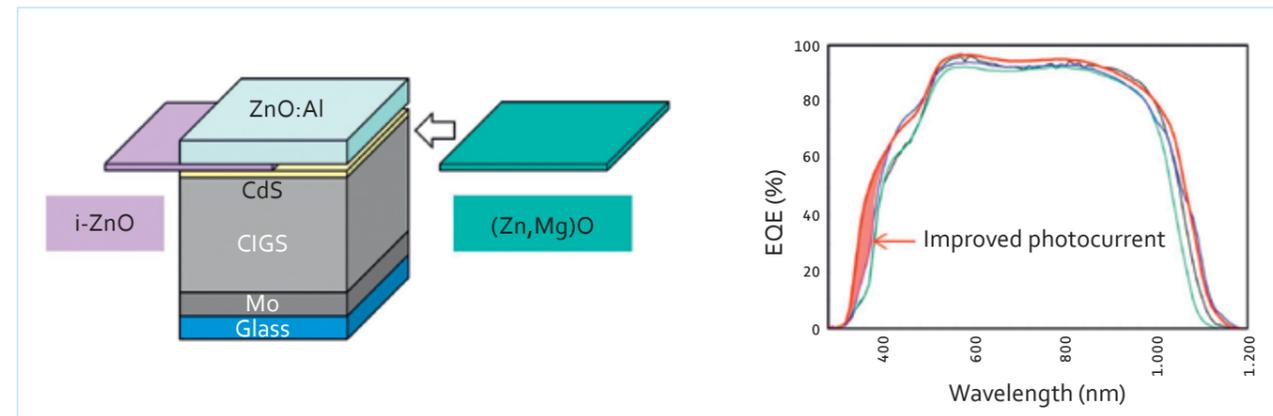
In 2016, excellent results were achieved once again in the key areas.

### // Rekord-Wirkungsgrad für CIGS-Solarzellen

Im Jahr 2016 wurde im Forschungsfeld der CIGS-Dünnschicht-solarzellen am ZSW weiter intensiv an der Verbesserung des Wirkungsgrads gearbeitet. Im Rahmen der in den letzten Jahren sehr erfolgreichen Alkali-Nachbehandlung haben gezielte Untersuchungen mit verschiedenen Alkali-Elementen, kombiniert mit der vorhandenen Analytik für dünne Materialschichten, zu einem tieferen Verständnis geführt. In der komplexen Heterostruktur muss immer stärker das Zusammenspiel zwischen dem CIGS-Absorber, der modifizierten Oberfläche und den folgenden Pufferschichten berücksichtigt werden. Durch den Einsatz von Zink-Magnesium-Oxid ((Zn,Mg)O) statt i-Zinkoxid (i-ZnO) konnte ein Stromgewinn erzielt werden (s. Abb. unten), der einen wichtigen Anteil am zertifizierten und im Juni publizierten Weltrekord-Wirkungsgrad von 22,6 % hatte. Das ist der höchste Wert für alle Dünnschicht-Photovoltaik-Technologien.

### // Record efficiency for CIGS solar cells

In 2016, a lot of effort at ZSW went into the research field of CIGS thin-film solar cells and their efficiency. Within the framework of the highly successful alkaline post-treatment in recent years, targeted investigations with various alkali elements – combined with existing analysis methods for thin material layers – have led to a deeper overall understanding. Within the complex heterostructure, the interplay between the CIGS absorber, the modified surface and the adjacent buffer layers has to be considered more thoroughly. By using zinc-magnesium oxide ((Zn,Mg)O) instead of i-zinc oxide (i-ZnO), a current gain was achieved (see fig. below) that was an important element of the certified and published world record efficiency of 22.6%. This is the highest efficiency of all thin-film photovoltaic technologies.



// Steigerung des Photostroms durch Ersatz von i-ZnO durch (Zn,Mg)O.  
// Increasing the photocurrent by replacing i-ZnO with (Zn,Mg)O.



### // Windenergieforschung auf der Schwäbischen Alb

Im Zuge des Ausbaus der Windenergie werden weltweit zunehmend auch bergige Gebiete erschlossen, in denen es aufgrund der Geländestruktur zu unregelmäßigen Windströmungen kommt. Der Betrieb ist dort schwieriger als im flachen Gelände, denn die Ertragsprognosen sind unsicherer und die mechanische Belastung der Anlagen sowie die Wartungskosten höher. Wie man die Leistung der Anlagen optimiert und deren Lebensdauer verlängert, untersucht nun das ZSW gemeinsam mit seinen Partnern des süddeutschen Windenergie-Forschungsclusters WindForS. Dazu wollen die Wissenschaftler ein Forschungstestfeld auf der Schwäbischen Alb bei Geislingen an der Steige errichten. Zahlreiche technologische Verbesserungen sollen dort erzielt werden, z. B. leisere, leichtere und leistungsstärkere Rotoren.

Geplant sind zwei Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von jeweils rund 750 kW und einer Nabhöhe von 75 m. Ihr Rotordurchmesser beträgt 50 m, die Gesamthöhe damit 100 m. Zu den Alleinstellungsmerkmalen des Projekts zählt, dass die Wissenschaftler uneingeschränkter Zugriff auf die komplette Steuerungstechnik und die Konstruktionsdaten der Anlagen erhalten, um deren Verhalten genauestens analysieren zu können. Vor und hinter jeder Anlage soll jeweils ein 100 m hoher Mast aufgestellt werden, an dem meteorologische Parameter zeitlich hoch aufgelöst gemessen werden können. Modernste Lasertechnik erfasst zudem die An- und Nachlaufströmung der Windenergieanlagen. Ein derartiges Windenergie-Testfeld gilt als weltweit einzigartig. Die Ergebnisse der Analysen sollen auf kommerzielle Großanlagen übertragbar sein und der Industrie neue Impulse liefern. Zum Einsatz kommen auch neue ZSW-Verfahren des maschinellen Lernens: Damit werden Einspeiseprognosen verbessert sowie Modelle für die Einbindung von Speichersystemen im zukünftigen Energiesystem optimiert.

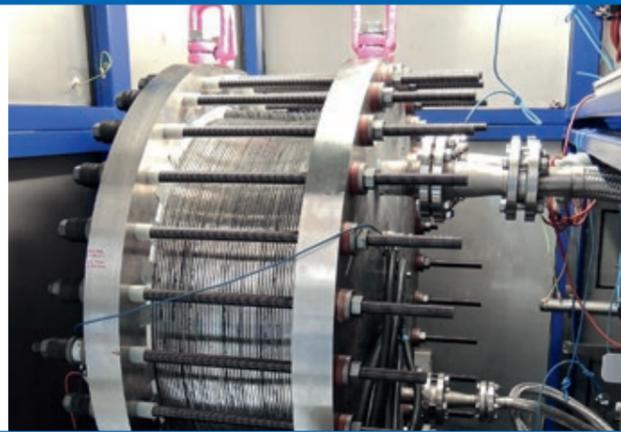
### // Wind power research in the Swabian Jura

In the course of global expansion of wind power mountainous areas with irregular wind flows resulting from the topography are increasingly involved. Operation in such locations is more difficult than on flat terrain, since yield forecasts are more uncertain, and mechanical loads of the plants and maintenance costs are higher as well. ZSW, together with its partners from the South German wind energy research cluster WindForS, is investigating ways to optimise turbine performance and extend its service life. For this purpose, scientists are currently endeavouring to set up a test area in the Swabian Jura near Geislingen an der Steige. A number of technological improvements are to be implemented here, for example, quieter, lighter and more powerful rotors.

Two wind turbines with a rated output of around 750 kilowatts each and a hub height of 75 meters are planned. The diameter of their rotors is 50 meters, and the turbines both stand 100 meters tall. One of the key features of the project is the scientists' unrestricted access to the control technology and the construction data of the turbines, in order to be able to analyse their behaviour and optimisation potentials in great detail. A 100-meter tower will be erected in front of and behind each turbine to measure meteorological parameters with a high temporal resolution. State-of-the-art laser technology also measures incoming and downstream flows. A wind power test site of this type will be unique. Analysis results should be transferable to commercial large-scale turbines and provide new impetus to the industry. New ZSW methods of machine learning are also being applied to improve feed-in forecasts and optimise models for the integration of storage systems in the future energy supply system.



// Kalandrieren einer Elektrode.  
// Calendring an electrode.



// 24-zelliger Druckelektrolyseblock im Probebetrieb.  
// Test operation of a 24-cell pressurised electrolysis block.



**// ZSW-Forschungsplattform (FPL) wird Integrations- und Referenzplattform der nationalen Batterieforschung**

Jeder einzelne Prozessschritt der industriellen Produktion von Lithium-Ionen-Zellen hat Einfluss auf deren Leistungsfähigkeit, Qualität und Kosten. Um diese Zusammenhänge systematisch aufzuklären und für alle Akteure in Deutschland zugänglich zu machen, wurde 2016 das Kompetenzcluster „ProZell“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung initiiert. Erstmals sollen die Kompetenzen nationaler Batterieforschungseinrichtungen an unterschiedlichen Standorten vereint werden. Ziel ist die Entwicklung und Schaffung einer wissenschaftlichen Basis für eine wettbewerbsfähige Batteriezellproduktion in Deutschland. Das ZSW ist Koordinator des übergeordneten Schnittstellenprojekts „QS-Zell“. Hierbei werden nicht nur die einzelnen Fertigungsschritte optimiert, sondern auch die Ergebnisse der anderen ProZell-Partner zusammengeführt und im industriennahen Maßstab mit der „Forschungsfabrik“ (FPL) in PHEV-1-Zellen validiert. Dieser Erfolg ist ein Beleg für die Exzellenz der Batterieforschung am ZSW.

**// Eigenentwicklung P2G®-Elektrolyse erfolgreich in Betrieb genommen**

Das ZSW hat das Projekt „P2G®-Elektrolyse“ mit der Entwicklung eines eigenen Konzepts zur alkalischen Druckelektrolyse (AEL) erfolgreich abgeschlossen. Der Zusammenbau des 300-kW-Blocks erfolgte bis Ende 2016 mit anschließendem Druck- und Dichttest. Dieser Block wurde in einen Elektrolysedemonstrator integriert. Mit der Inbetriebnahme wurden alle übergeordneten P2G®-Elektrolyse-Projektziele – eigenes Block- und modulares Systemkonzept, hocheffizientes Gleichrichtersystem, geprüfte Produktgasüberwachung, angepasstes Betriebs- und Sicherheitsüberwachungssystem – nach vier Jahren Laufzeit erreicht. Die ZSW-Elektrolyseanlage soll nun als Teil des Leuchtturmprojektes „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ weiter genutzt und zu Forschungszwecken am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein betrieben werden.

**// The ZSW research platform (FPL) becomes an integration and reference platform for national battery research**

Every individual process step in industrial lithium-ion cell production affects performance, quality and cost. In order to systematically illuminate these relationships and open them up for use by all stakeholders in Germany, the 'ProZell' cluster of expertise was initiated by the German Federal Ministry of Education and Research in 2016. For the first time, the expertise of battery research facilities throughout the nation will be bundled. The aim is to develop and create a scientific foundation for competitive battery cell production in Germany. ZSW is coordinating the superordinate interface project "QS-Zell". In addition to optimising individual production steps, the results of the other 'ProZell' partners are bundled in "QS-Zell" and validated on an industrially relevant level in PHEV1 cells using the "Research factory" (FPL). This success is proof of the excellence of battery research at ZSW.

**// In-house development P2G® electrolyser successfully brought into operation**

ZSW successfully completed the project P2G®-Electrolysis after developing its own alkaline pressurised electrolysis (AEL) concept. The 300-kW block was fully assembled by the end of 2016 and concluded with a pressure and leak test. It was then integrated into the electrolysis demonstrator. All of the global P2G®-Electrolysis project goals – a separate block and a modular system concept, a highly efficient rectifier system, approved product gas monitoring, and adapted operating and safety monitoring system – were achieved four years into the project. The ZSW electrolyser will now be used in the flagship project Power-to-Gas Baden-Wuerttemberg, and for research purposes it will be used at the hydroelectric power station Wyhlen am Hochrhein.



// Elektrodenpackage mit katalytisch aktiver Kathodenbeschichtung.  
// Electrode package with catalytically active cathode coating.

**// Mobiles Messsystem zur Abnahme von H<sub>2</sub>-Tankstellen**

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) als Energieträger ist regenerativ in großen Mengen herstellbar und aufgrund des hohen Energieinhaltes ein idealer Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Diese zeichnen sich durch hohe Reichweiten aus und der Betankungsvorgang dauert mit dem Druckgas nur wenige Minuten. Entscheidend für die breite Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen ist der Aufbau eines H<sub>2</sub>-Tankstellen-Netzes. Dieses soll bundesweit bis 2018/2019 von heute rund 50 auf 100 „H<sub>2</sub>-Zapfsäulen“ ausgebaut werden.

H<sub>2</sub>-Zapfsäulen oder „Hydrogen Refueling Stations“ (HRS) müssen vor der Erstinbetriebnahme abgenommen und auch danach regelmäßig überprüft werden. Das ZSW bietet mit einem speziell entwickelten Gerät inzwischen die Abnahme der Betankungsqualität nach der weltweit für HRS angewandten Richtlinie SAE J2601 an (s. Abb. links unten). Das Messsystem erfasst getankte H<sub>2</sub>-Mengen (s. Abb. rechts unten) und kann somit zur Entwicklung einer eichfähigen Mengemessung beitragen. Parallel können auch Proben zur Qualitätsanalyse entnommen und im neuen H<sub>2</sub>-Analytiklabor am ZSW ausgewertet werden.

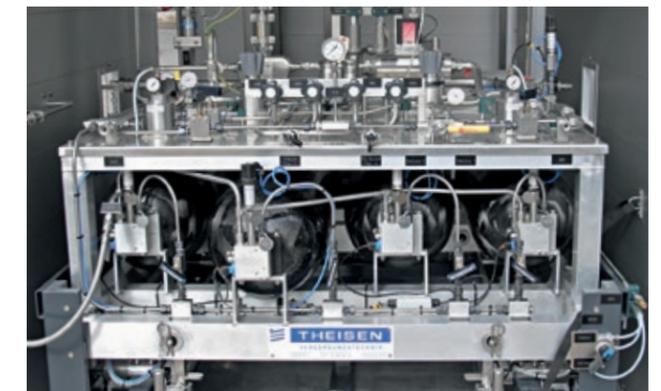
**// Mobile measuring system for the approval of hydrogen refuelling stations**

Hydrogen (H<sub>2</sub>) as an energy carrier is renewable, can be produced in large quantities and is, among other things, suitable as a fuel for fuel cell vehicles. These vehicles are characterised by high ranges, and refuelling takes only a few minutes with compressed H<sub>2</sub> gas. The construction of a hydrogen refuelling station network is crucial for a wide market launch of fuel cell vehicles. The nationwide network is to be expanded from today's about 50 to 100 hydrogen dispensers by 2018/2019.

Hydrogen refuelling stations (HRS) must be approved before commissioning, and require regular inspections. With a specially developed device, ZSW now offers approval services for the fuel quality according to the SAE J2601 directive, which applies to HRS worldwide (see fig. bottom left). The measuring system detects filled hydrogen quantities (see fig. bottom right) and can thus contribute to the development of a calibratable quantity measurement. In parallel, samples can be taken and evaluated for quality purposes in the new special analysis laboratory at ZSW.



// Neues Messsystem zur Abnahme von H<sub>2</sub>-Tankstellen nach der Richtlinie SAE J2601.  
// New measuring system for inspecting hydrogen refuelling stations in compliance with the SAE J2601 directive.



// Messeinheit zur Erfassung der getankten H<sub>2</sub>-Menge.  
// Measuring unit for recording the dispensed hydrogen quantity.



// Schwerpunktbericht  
Mobilität der Zukunft

// Focus Report  
Mobility of the Future

# // Mobilität der Zukunft

# // Mobility of the Future



Elektromobilität – Schlüsseltechnologien und Energieversorgung für eine nachhaltige Mobilität

E-mobility – key technologies and energy supply for sustainable mobility

Abbildung ©Daimler AG

Vor 140 Jahren stieß der Benz Patent-Motorwagen in der Bevölkerung überwiegend auf Kritik. Erst als Berta Benz 1888, heimlich und gemeinsam mit ihren Söhnen und Kraftstoff aus der Apotheke, mit dem Fahrzeug ihres Mannes Carl die 106 km von Mannheim nach Pforzheim fuhr, begannen sich die Vorbehalte in der Öffentlichkeit zu reduzieren.

140 years ago, reactions to the Benz patent motor car were predominantly critical. It was not until Berta Benz bought fuel at the pharmacy and took her two sons on a secret 106-km drive from Mannheim to Pforzheim in her husband Carl's vehicle in 1888 that the public started to become less reserved.



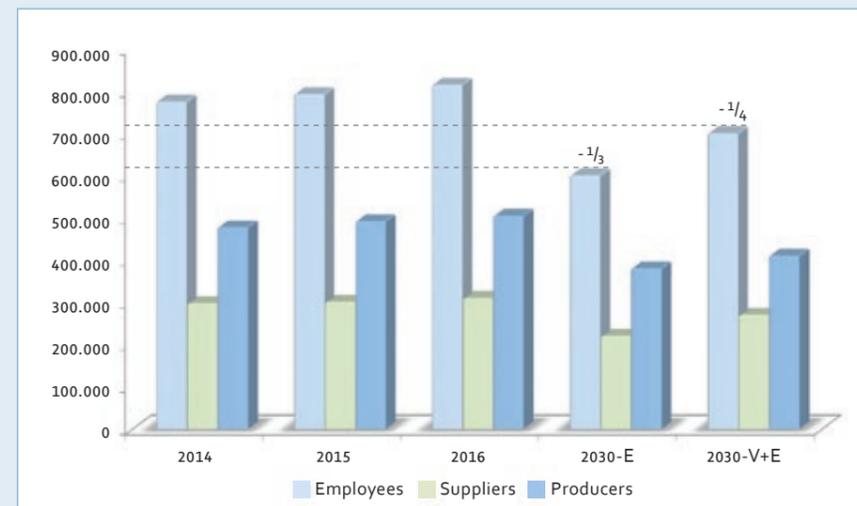
// Brennstoffzellenauto an der Wasserstoffstation (H<sub>2</sub>-Tankstelle) am ZSW in Ulm.  
// Fuel cell car at the hydrogen fuelling station at ZSW in Ulm.

Erst 20 Jahre später begann mit Henry Ford und der Massenfertigung des Model T der Siegeszug des Automobils, das bis heute, rund 100 Jahre später, ein wesentlicher Bestandteil unseres Alltags ist. Mehr als eine Milliarde Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind auf den Straßen der Welt unterwegs. Jedes Jahr werden mehr als 90 Millionen neue Autos – davon alleine 25 Millionen in China – produziert. In Deutschland hängen sehr viele Arbeitsplätze am Automobil (s. Abb. unten).

20 years later, Henry Ford and his mass-produced Model T kicked off the triumphal march of the automobile which today, around 100 years later, determines our daily life. Over one billion diesel and petrol vehicles running on fossil fuels are populating the streets of the world today. Every year, over 90 million new cars are being produced, with China accounting for 25 million alone. In Germany, many jobs are related to the automotive industry (see fig. below).

Mit der Elektromobilität scheint sich die Geschichte zu wiederholen. 2016 kann als Wendepunkt des Automobils bezeichnet werden. Elektrofahrzeuge, ob mit Batterien, Brennstoffzelle oder als Hybridantrieb, gewinnen rasant an Bedeutung. Ende 2016 waren weltweit mehr als 2 Millionen elektrisch betriebene Fahrzeuge auf der Straße. Die jährliche Produktionsrate nimmt extrem schnell zu und wird 2017 ein Niveau von einer Million Elektrofahrzeugen überschreiten. Im Jahr 2025 wird diese Zahl bei etwa 20 Millionen liegen. Damit einher gehen große technologische Veränderungen. Dieseleinspritzpumpen, Ventile und Kolben, Getriebe und Kupplungen verlieren an Bedeutung. Batterien, Brennstoffzellen, Elektromotoren und Leistungselektronik bestimmen die Charakteristika künftiger Fahrzeugantriebe. Nach einer aktuellen Abschätzung des Center of Automotive Management (CAM) werden von den heute 800.000 Beschäftigten der Automobilindustrie, je nach Anteil der Elektrofahrzeuge (s. Abb. unten), zwischen 100.000 und 200.000 Arbeitsplätze bis 2030 verloren gehen, sofern nicht gegengesteuert wird und hohe Anteile der Wertschöpfungskette der Elektromobilität in Deutschland etabliert werden.

History appears to repeat itself in the field of e-mobility. 2016 now looks like the turning point in the history of the motorcar. E-vehicles, whether powered by batteries, fuel cells or hybrid motors, are rapidly gaining popularity. At the end of 2016, over 2 million electric cars were on the streets worldwide. The annual production rate is accelerating rapidly, and the threshold of one million electric cars will be crossed in 2017. In 2025, around 20 million electric cars will be produced. This trend entails significant technological change. Diesel injection pumps, valves and pistons and gears and clutches are all becoming less important, while batteries, fuel cells, electric motors and power electronics are determining the properties of future vehicle drives. According to current estimates by the Center of Automotive Management (CAM), around 100,000 to 200,000 of the current 800,000 jobs in the automotive industry will be lost by 2030, depending on the share of electric cars (see fig. below), unless countermeasures are taken and a high proportion of the added value chain for electric mobility can be established in Germany.



// Szenario der Arbeitplatzeffekte in Deutschland bis 2030 durch Elektromobilität (100% E versus 50% V+E Marktanteil).  
// Scenario of the employment effects in Germany through electric mobility (100% E versus 50% V+E market share).  
Source: CAM.



// Forschungsplattform zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen: Anlage zum Vorformieren prismatischer Wickelzellen (PHEV-1-Format).  
// Research platform for the industrial production of lithium-ion-cells: Preformation system for wound prismatic cells (PHEV-1-format).

## Schlüsseltechnologie Lithium-Ionen-Batterie

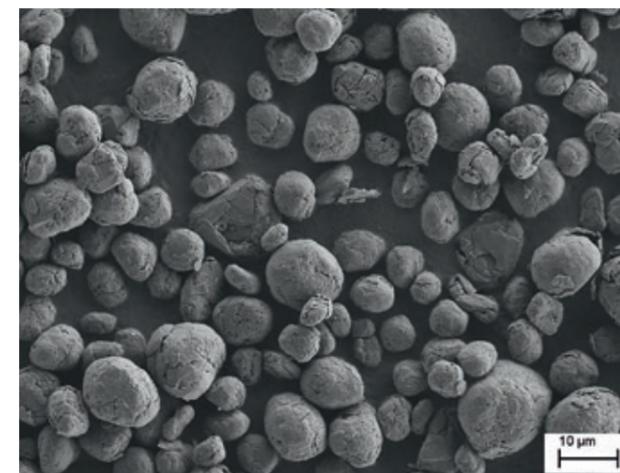
Die Lithium-Ionen-Technologie feierte 2016 ihr 25-jähriges Jubiläum. Die grundlegenden Forschungsarbeiten zur Interkalation von Lithium-Ionen (daher der Name) in einen Festkörper wie Grafit oder Metalloxid fanden in den 1970er Jahren an der TU München (J.O. Besenhard et al) statt. 1991 begann Sony die Kommerzialisierung und verhalf damit der portablen Unterhaltungselektronik zum Durchbruch. Heute werden beispielsweise 150 Millionen Smartphones mit Lithium-Ionen-Zellen pro Monat produziert. E-Bikes, Power Tools und Tablets sorgen zusätzlich für hohe Wachstumsraten bei der Produktion von Batterien. 2016 lag der weltweite Umsatz für Lithium-Ionen-Zellen bei mehr als 20 Mrd. US-Dollar (bei jährlichen Wachstumsraten von etwa 20%).

Ein erheblicher Anteil der Wertschöpfung entfällt auf die Antriebsbatterien, wofür die Lithium-Ionen-Technologie die Speichertechnologie der Wahl ist. Die automobiltypischen Anforderungen wie extreme Temperaturbereiche, Energiedichte, Leistung, Crash-Sicherheit und Kosten stellen auch weiterhin große Herausforderungen für die Materialforschung und Elektrochemie dar. Die kurz- und mittelfristig geplanten Produktionsmengen für Fahrzeuge erfordern nicht nur Investitionen in neue Fabriken im zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich, sondern auch neue, fortschrittliche Produktionstechnologien (s. Abb. oben).

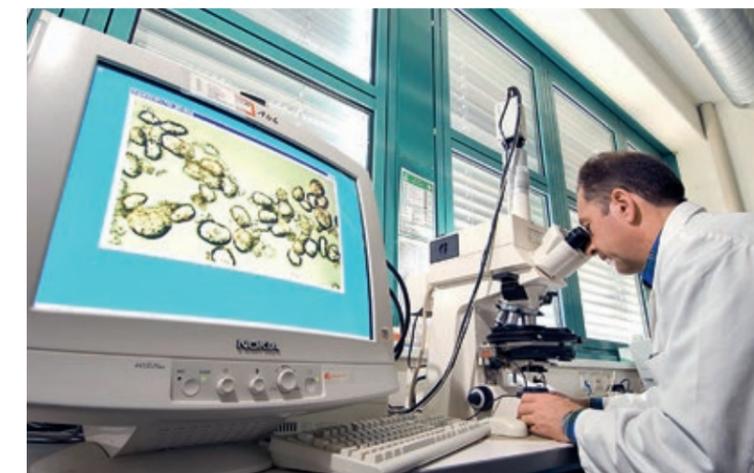
## Key technology Lithium-ion battery

Lithium-ion technology celebrated its 25th anniversary in 2016. The basic research on the intercalation of lithium-ions (hence the name) into a solid body, such as graphite or metal oxides, was carried out at the Technical University of Munich in the 1970s (J.O. Besenhard et al). In 1991, Sony started commercialising the technology, thereby paving the way for the breakthrough of mobile consumer electronics. For instance, 150 million smartphones with lithium-ion cells are currently being produced every month. E-bikes, power tools and tablets also drive growth rates in battery production. In 2016, global turnover generated with lithium-ion cells topped USD 20 billion (with annual growth rates of approx. 20%).

A major share of the added value in electric mobility is in the traction batteries, whereby the lithium-ion technology is the storage technology of choice. Specific automotive requirements (extreme temperature ranges, energy density, performance, crash resistance and costs) continue to pose significant challenges in terms of materials research and electrochemistry. The vehicle production volumes planned in the short- and medium-term require investments in new factories in the double-digit billions (euros) as well as new, advanced production technologies (see fig. above).



// Mikroskopische Aufnahme gerundeter Naturgraphitpartikel.  
// Microscopic imaging of spheroidised natural graphite particles.



// Analyse der Partikelstruktur in einem Lichtmikroskop.  
// Particles structure analysis in an optical microscope.

Eines der Topthemen für künftige Batteriegenerationen ist die Entwicklung neuer Aktivmaterialien, um Engpässe bei der Verfügbarkeit von speziellen Rohstoffen zu umgehen. Ein Beispiel dafür ist Grafit. Mit ca. 90% Marktanteil stellt es das wichtigste Anodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien dar. Ungefähr die Hälfte davon entfällt auf Naturgraphit, der heute vorwiegend in China abgebaut wird. Um neue Quellen und Lieferanten für Grafit zu erschließen, ist es entscheidend, die Veredelungsprozesse vom Rohmaterial hin zu einem guten Anodenmaterial zu verstehen. Dazu gehört der sogenannte Rundungsprozess für die Grafitpartikel („sphäroidisierter Grafit“ s. Abb. oben). Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „Li-EcoSafe“ konnte am ZSW dieser Rundungsprozess für Grafit erfolgreich etabliert werden. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften und elektrochemischer Performance. Dieses Verständnis ist entscheidend, um neue Lieferanten bei der Qualifikation ihrer neuen Produkte für die Zellhersteller zu unterstützen.

Eine andere Alternative ist die Verwendung von Silizium (Si) als Anodenmaterial. Die Verfügbarkeit von Silizium kann fast als unbegrenzt bezeichnet werden und die Kapazität des Materials ist hoch. In dem europäischen Verbundprojekt „5VB“ entwickelt das ZSW innovative Batteriezellen von der Elektrodenpaste bis zur kompletten Zelle auf Basis eines neuen Silizium-Kompositmaterials. Das neue Aktivmaterial weist mit 1.100 mAh/g etwa die dreifache Kapazität des heutigen grafitbasierten Anodenmaterials auf. Das bedeutet, dass Zellen mit diesem neuen Material eine um mehr als 20% höhere spezifische Energiedichte aufweisen. Der größte Erfolg ist bisher die im Vergleich zu anderen Si-haltigen Anodenmaterialien recht gute Zyklenstabilität. In ersten Zellen konnten bereits mehr als 300 Vollzyklen demonstriert werden, bevor sich die Anfangskapazität auf 80% reduziert hat.

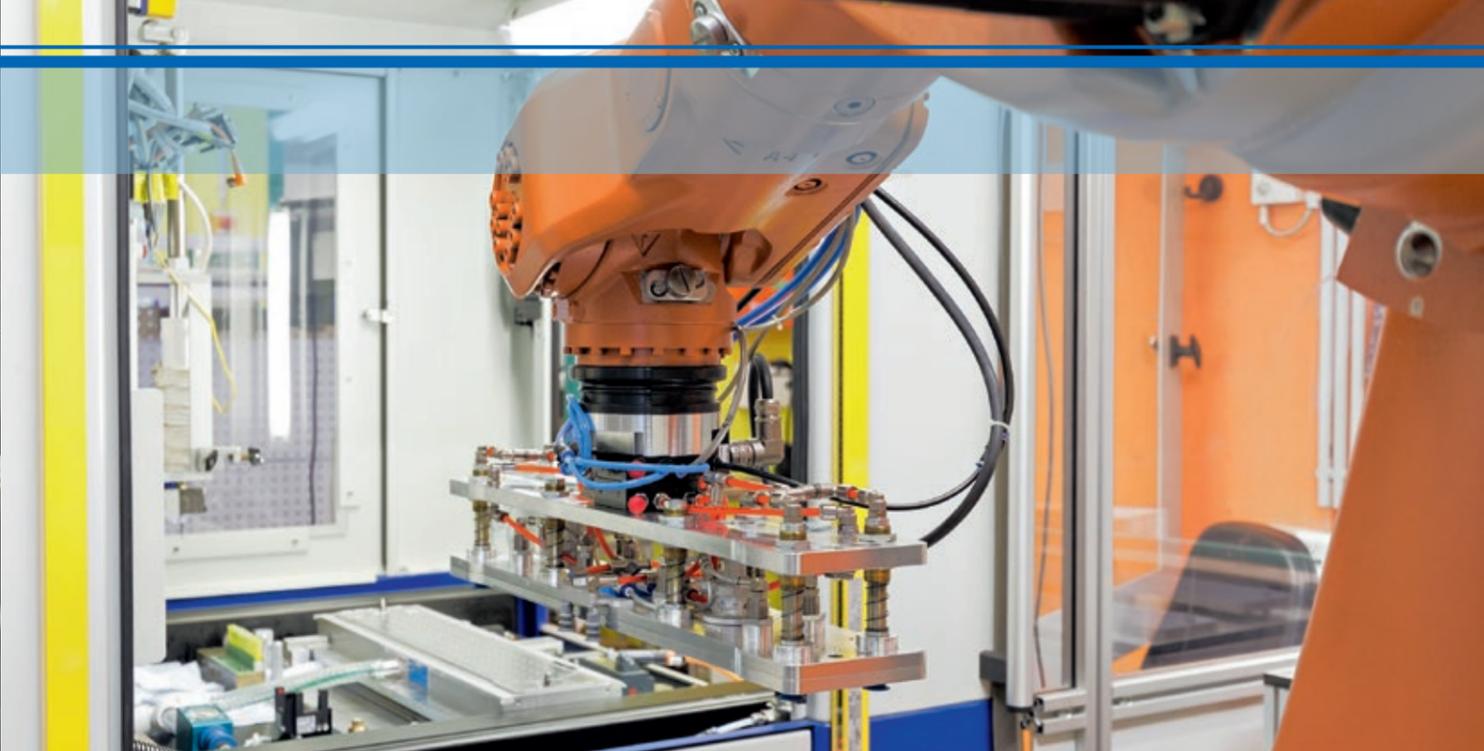
Among the key subjects relevant to future battery generations is the development of new active materials to tackle availability issues of special raw material. One example is graphite which, at a 90% market share, is the most important anode material in lithium-ion batteries. Natural graphite, which is now predominantly mined in China, accounts for approx. one half of this. The identification of new graphite sources and suppliers requires a thorough understanding of the refinement processes from raw material to high-quality anode material. This includes the so-called rounding process for graphite particles (‘spheroidised graphite’, see image above). In the context of the “Li-EcoSafe” project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), ZSW has succeeded in establishing such a graphite rounding process. The investigation of correlations between material properties and electrochemical performance is a central aspect of the project. This understanding is crucial when it comes to assisting new suppliers to qualify their new products for cell manufacturers.

Alternatively, silicon (Si) can be used as an anode material. The availability of silicon is almost unlimited, and the material’s capacity is high. In the context of the joint European “5VB” project, ZSW is developing innovative battery cells, from electrode slurry to the full cell, based on new silicon composite materials. At 1,100 mAh/g, this new active material has around three times the capacity of current graphite-based anode materials. This means that the specific energy density of cells made from the new material is over 20% higher. The biggest success so far has been the respectable cycle stability of the material compared to other silicon anode materials. Initial cells have survived over 300 full cycles before the initial capacity declined to 80%.

# // Focus



// Fahrzeugtaugliche Hochleistungsbrennstoffzelle mit 100-kW-Dauerleistung im ZSW-Teststand.  
// Vehicular high-performance fuel cell with 100 kW continuous power on the ZSW test bench.



// Montageanlage mit Mehrachsroboter zum lagegerechten Positionieren einzelner Brennstoffzellenkomponenten.  
// Assembly line with multiaxial robot for accurate positioning of individual fuel cell components.

## Schlüsseltechnologie Brennstoffzelle

Elektromobilität umfasst auch Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle, die Wasserstoff in Strom wandeln. Bei dieser Antriebsvariante erfolgt die Energiespeicherung über Wasserstoff, der in Drucktanks gespeichert wird. Der Standard für Pkw ist die 700-bar-Technologie. Dies hat zur Folge, dass das Wiederaufladen, sprich „Betanken“, nur drei Minuten dauert und die Reichweite von Brennstoffzellen-Fahrzeugen je nach Fahrzeugtyp zwischen 400 und 700 km liegt. Für den Fahrer bedeutet das eine ähnlich flexible und bequeme Nutzung seines Fahrzeugs, wie er es heute mit klassischen Antrieben gewohnt ist. Bevorzugte Anwendungen sind Reiselimousinen, Transporter und Stadtbusse – emissionsfrei.

Der Wirkungsgrad („Tank-to-Wheel“) von Brennstoffzellen ist zwar geringer als der von batterieelektrischen Antrieben, aber immer noch doppelt so hoch wie der von Verbrennungsmotoren. Die Verluste in der Brennstoffzelle haben einen wichtigen und positiven Nebeneffekt für den Nutzer: Mit der „kostenlosen“ Abwärme der Brennstoffzelle kann das Fahrzeug an kalten Tagen sehr einfach beheizt werden.

Die Kommerzialisierung von Brennstoffzellenfahrzeugen hat Fahrt aufgenommen. Im letzten Jahr wurden weltweit bereits 5.000 Fahrzeuge verkauft. Für eine breite Marktdurchdringung ist vor allem der Aufbau einer spezifischen Zulieferindustrie er-

## Key technology fuel cell

E-mobility also comprises electric cars driven by fuel cells converting hydrogen into electricity. In this type of drive system, energy is stored via hydrogen which, in turn, is stored in pressure tanks. The standard for passenger cars is the 700-bar technology. Recharging, in other words fuelling the car, only takes three minutes and provides the fuel cell car with a range between 400 and 700 km, depending on the specific type of vehicle. For drivers, this means that fuel cell cars can be used as flexibly and conveniently as conventional cars. Preferred applications include long distance cars, transporters and city buses – all emission-free.

Although the tank-to-wheel efficiency of fuel cells is lower than that of battery electric drives, it is still twice the figure reached by combustion engines. Losses in the fuel cells have an important positive side effect for users: the 'free' waste heat produced by the fuel cell can be conveniently used to heat the vehicle on cold days.

The commercialisation of fuel cell cars has picked up speed. Last year, as many as 5,000 cars were sold worldwide. Broad market penetration especially requires the establishment of a specific supplier industry. The European 'Auto-StackCORE' research

förderlich. Mit dem Ziel, eine neue Generation fahrzeugtauglicher Brennstoffzellen zu entwickeln und die Grundlagen für eine europäische Serienfertigung zu legen, wurde 2013 der europäische Forschungsverbund „Auto-StackCORE“ initiiert. Das ZSW koordiniert das Netzwerk aus neun Automobilherstellern und Zulieferern sowie fünf Forschungsinstituten. Die neuen Brennstoffzellen sollen die Fahrzeuganforderungen an Volumen, Leistung, Lebensdauer und Sicherheit erfüllen sowie eine deutliche Kostenreduktion ermöglichen.

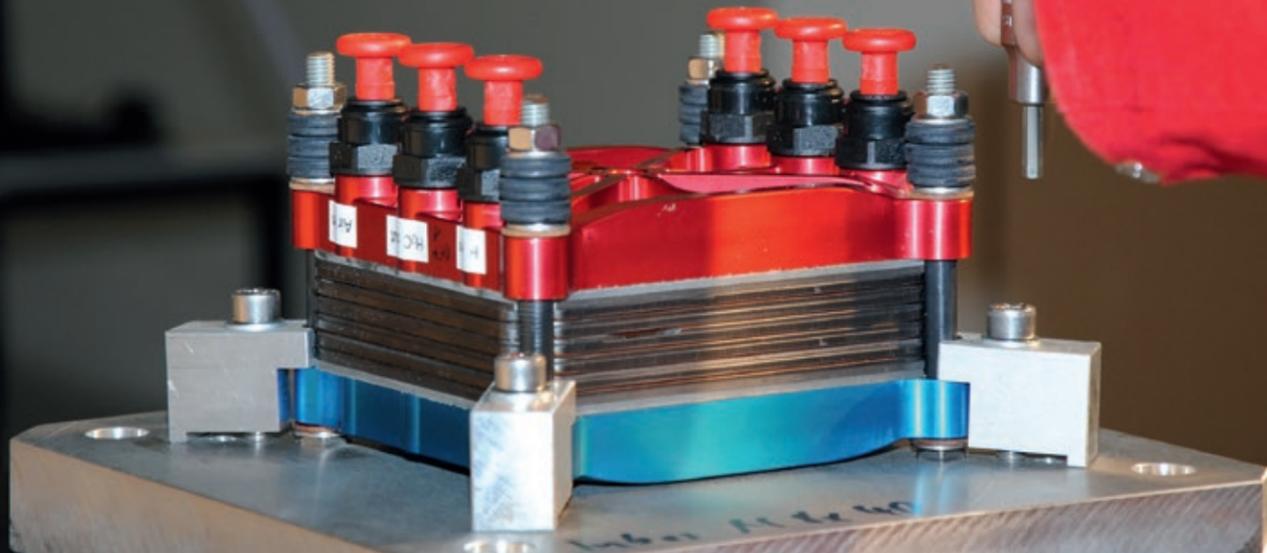
Im Rahmen von „AutoStackCORE“ konnte inzwischen die zweite Entwicklungsgeneration einer Hochleistungsbrennstoffzelle erfolgreich demonstriert werden (s. Abb. links oben). Mit einem Volumen von weniger als 30 Litern für einen Brennstoffzellenstack mit rund 100 kW Dauerleistung konnte das Team einen weltweiten Rekord verbuchen. Die Brennstoffzelle inklusive des Luftkompressors, des Wasserstoff-Rezirkulationsgebläses und der Kühlwasserpumpe passt inzwischen unter die Motorhaube und beansprucht nur noch einen ähnlichen Bauraum wie ein Verbrennungsmotor.

consortium was established in 2013 with the aim of developing a new generation of automotive fuel cells for cars and laying the foundation for series production in Europe. ZSW is in charge of coordinating the consortium, which consists of nine car manufacturers and suppliers as well as five research institutes. The new fuel cells should meet the vehicle specifications pertaining to volume, performance, durability and safety, while offering significant cost reductions.

In the context of 'AutoStackCORE', the second development generation of a high-performance fuel cell has now been successfully demonstrated (see image, above left). The team has achieved a global record with a volume of less than 30 l for a fuel cell stack providing around 100 kW continuous power. On top of this, the fuel cell including air compressor, hydrogen recirculation fan and cooling water pump now fits under the hood of a car, roughly occupying the same space as a combustion engine.



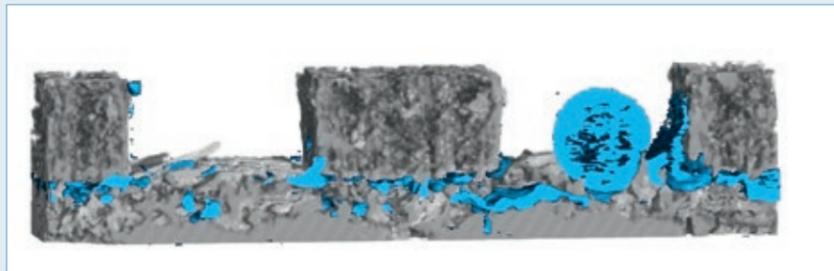
// Qualitätssicherung der Gasverteilerstrukturen mittels Weißlichtinterferometer.  
// Quality assurance of the gas distribution field using white light interferometers.



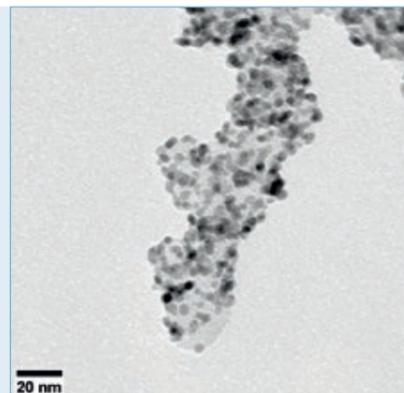
// Brennstoffzellenstack auf dem Vibrations- und Schockprüfstand.  
// Fuel cell stack at the vibration and shock test rig.

Das ZSW hat mit der Optimierung der Gasverteilerstrukturen und seinem tiefen Verständnis für Wassertransportvorgänge und Elektrochemie (Beispiele s. unten) in der Zelle wichtige Beiträge zu diesem Erfolg geleistet. Bei Stromdichten von bis zu  $3 \text{ A/cm}^2$  und einer Zelldicke von  $1,2 \text{ mm}$  bedarf es einer mikrometergenauen Anpassung der Kanäle für die Luft- und Wasserstoffversorgung, um eine homogene Medien- und Temperaturverteilung über alle Betriebszustände und über lange Betriebszeiten sicherzustellen. Inhomogenitäten würden zu einer gravierenden Schädigung von Katalysator und Membran führen. Daher spielt die Entwicklung von neuen Methoden zur Qualitätssicherung bei der Herstellung und Überprüfung von Bauteilen und der hochpräzisen Assemblierung der Zellen eine wichtige Rolle. Roboterunterstützte Zellmontage oder Weißlichtinterferometer zur Prüfung der Gaskanalstrukturen sind nur zwei Beispiele (s. Abb. S. 21).

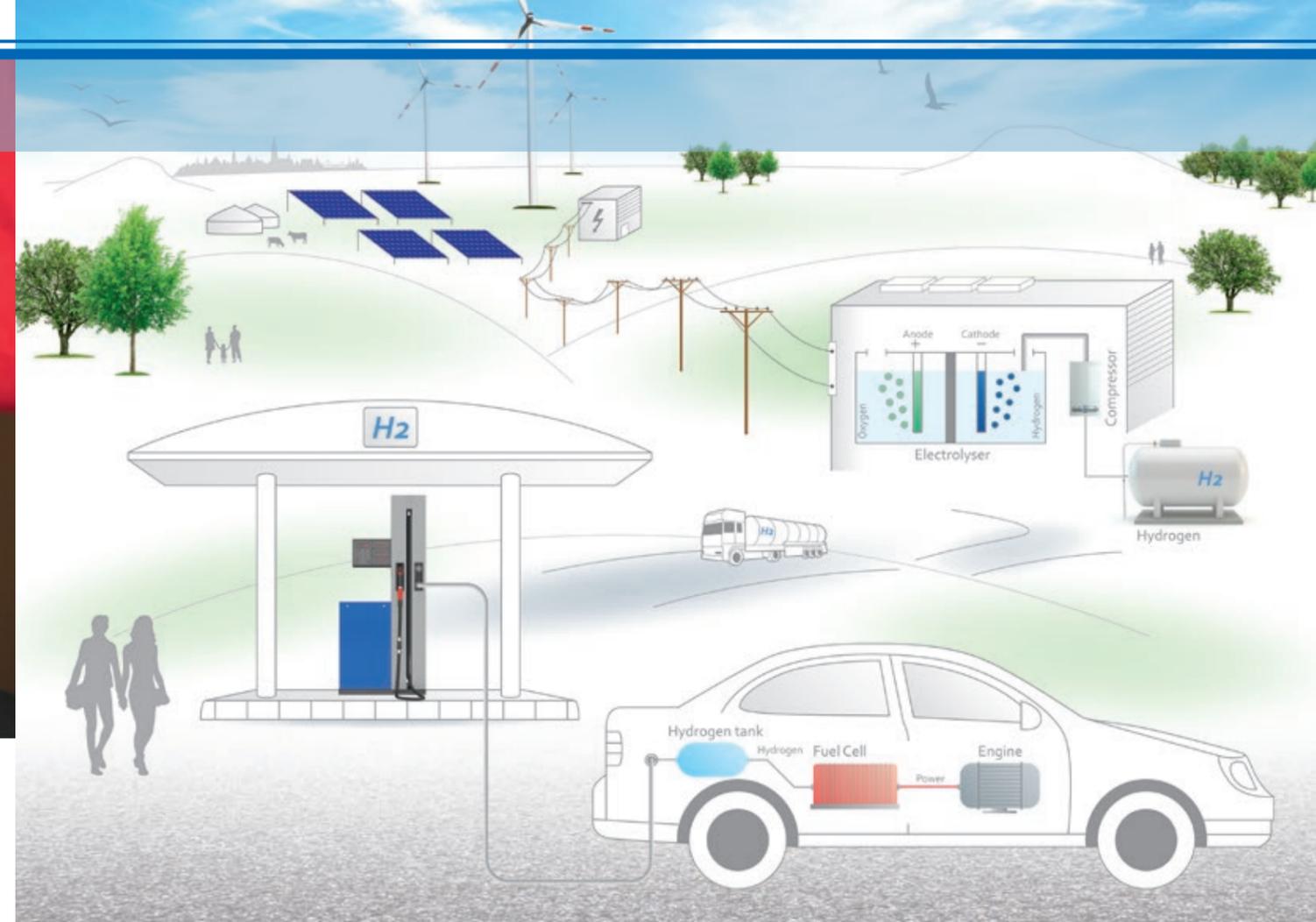
ZSW's optimisation of the gas distribution field and its in-depth knowledge of water transport processes and electrochemistry in cells have made important contributions to this success (see examples below). At power densities of up to  $3 \text{ A/cm}^2$  and cell thicknesses of  $1.2 \text{ mm}$ , the air and water supply channels must be adjusted down to the micrometre to ensure homogeneous media and temperature distribution across all operating conditions and over long operating hours. Inhomogeneity leads to serious damage of the catalyst and the membrane. Both the development of new quality assurance methods in the manufacture and testing of components and the highly precise assembly of the cells play an important role. Robot-assisted cell assembly and the use of white light interferometers in gas canal structure testing are just two examples (see image, p. 21).



// Mittels Synchrotron-Tomographie visualisierte Wasserverteilung in einer Brennstoffzellenelektrode im Betrieb bei  $1 \text{ A/cm}^2$ .  
// Water distribution in a fuel cell electrode visualised via synchrotron tomography in operation at  $1 \text{ A/cm}^2$ .



// Mikroskopische Aufnahme (TEM) von Platin-Nanopartikeln auf einem neuen Katalysatorträger.  
// Microscopic imaging (TEM) of platinum nano-particles on new catalyst support material.



// Wie aus Wind und Sonne über Elektrolyse Wasserstoff als Kraftstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge wird.  
// How electrolysis can transform wind and sunlight into hydrogen for fuel cell cars.

## Infrastruktur für die Elektromobilität: Strom und Wasserstoff tanken

Der typische deutsche Pkw-Fahrer nutzt sein Fahrzeug im Normalfall eine, höchstens zwei Stunden am Tag. In dieser Zeit legt er höchstens  $40 \text{ km}$  zurück. Übertragen auf ein batterieelektrisches Fahrzeug bedeutet dies, dass täglich weniger als  $10 \text{ kWh}$  Strom nachgeladen werden müssen und dafür mehr als  $22 \text{ Stunden}$  zur Verfügung stehen. Dafür reicht eine normale Steckdose zu Hause oder am Arbeitsplatz aus. Für Langstreckenfahrten und kommerzielle Nutzer wie Taxis und Paketdienste ist eine Schnellladung der Batterie wünschenswert. Dafür werden derzeit, insbesondere entlang der Autobahnen, Schnellladestationen mit Leistungen bis zu  $300 \text{ kW}$  aufgebaut. Dieses Schnellladen erfordert allerdings auch Technologien (Aktivmaterialien, Zelldesign, Batteriekühlung), die eine Schädigung der Zellen minimieren. Aber auch die Stromversorgung an der Tankstelle muss für diese Ladeleistung ausgelegt sein. Häufig ist dort der Einsatz einer Pufferbatterie sinnvoll, um damit den teuren Ausbau des lokalen Netzes zu vermeiden.

Bei der Infrastruktur zum Betanken von Brennstoffzellenfahrzeugen mit Wasserstoff ist die Situation dagegen ganz anders und vergleichbar mit dem heute gewohnten Tanken fossiler Kraftstoffe. Aufgrund der hohen Reichweite und kurzen Betankungszeit der Brennstoffzellenfahrzeuge müssen heutige Tankstellen „nur“ mit einer zusätzlichen Zapfsäule für Wasserstoff nachgerüstet werden.

## E-mobility infrastructure: filling up on electricity and hydrogen

In Germany, drivers typically use their cars for no more than one or two hours a day. During this time, they usually cover less than  $40 \text{ km}$ . In terms of battery electric cars, this translates into a power requirement of less than  $10 \text{ kWh}$ , leaving over  $22 \text{ hours}$  charging time. A normal socket at home or at work is sufficient to cover this requirement. Long-distance travel and commercial use, such as taxis or delivery services, require fast battery charging. Along the motorways, fast charging stations are currently being set up with outputs of up to  $300 \text{ kW}$ . However, fast charging also requires technologies (active materials, cell design and battery cooling) that minimise cell damage. In addition, the power supply at the filling station must support the required power level. The use of stationary buffer batteries is often expedient to avoid costly expansion of local networks.

The infrastructure for fuel cell cars running on hydrogen is a different matter altogether. Here, the situation is similar to conventional fossil fuel stations. Thanks to the extensive range and short fuelling time of fuel cell cars, current filling stations 'simply' need to be retrofitted with an additional hydrogen fuel dispenser.



// Zum Laden von batterieelektrischen Autos reicht eine „normale“ Steckdose.  
// A normal socket is sufficient to charge a battery electric vehicle.

Die Tankstellentechnologie für Wasserstoff steht heute noch am Anfang der Industrialisierung und erfordert noch einigen Aufwand, bis eine flächendeckende und zuverlässige Infrastruktur steht.

Ein Element aus dem Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur ist die Sicherstellung der für Brennstoffzellen erforderlichen Wasserstoffqualität. Dabei geht es nicht darum, eine möglichst hohe Reinheit des Wasserstoffs zu erzielen – das wäre viel zu teuer. Vielmehr muss sichergestellt werden, dass der Wasserstoff keine Katalysatorgifte enthält. Dazu gehören z. B. Kohlenmonoxid oder schwefelhaltige Kohlenwasserstoffe. Das ZSW hat jüngst eine neue Methode entwickelt, mit der sehr einfach und vor Ort die Qualität überprüft werden kann. Im nächsten Schritt geht es darum, diese Methode gemeinsam mit einem Industriepartner zu einem alltagstauglichen Sensor weiterzuentwickeln.

Ein weiteres Thema, das ebenfalls vom Umweltministerium des Landes Baden-Württemberg gefördert wurde, ist die Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit des Betankungsvorgangs. Hierzu hat das ZSW ein mobiles Abnahmesystem entwickelt, das eine exakte Überprüfung der getankten Menge Wasserstoff erlaubt (s. Abb. unten). Damit können sowohl neue Tankstellen freigegeben, als auch bestehende Tankstellen regelmäßig überprüft und geeicht werden.



// Mobiles Messsystem zur Abnahme von H<sub>2</sub>-Tankstellen.  
// Mobile measuring system for inspecting H<sub>2</sub> filling stations.



// Die Betankung von Brennstoffzellenautos mit H<sub>2</sub> erfolgt über Druckgas an Wasserstofftankstellen.  
// Filling of a fuel cell car is possible via compressed gas at H<sub>2</sub> filling stations.

Hydrogen fuelling station technology is still at the beginning of the industrialisation stage and requires more work and funds before a comprehensive, reliable infrastructure is in place.

When setting up the hydrogen infrastructure, it is important that the hydrogen quality required for fuel cells is guaranteed. This is not a question of maximising the hydrogen purity – which would be far too expensive. It is rather a question of ensuring that catalyst poisons are not in the hydrogen. The latter include, for instance, carbon monoxide and sulphur containing hydrocarbons. ZSW has recently developed a new method for convenient on-site hydrogen quality testing. As a next step, this method must be refined in conjunction with an industrial partner to develop a sensor that is suitable for everyday use.

A further aspect, which was also funded by the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg, is the reproducibility and measurement accuracy of the fuelling process. ZSW has developed a mobile inspection system that allows for accurate measuring of the amount of hydrogen fuel (see fig. below). This system facilitates both the approval of new fuelling stations and regular checks and calibrations of existing stations.

## Erneuerbare Energien und Elektromobilität

Die Versorgung mit Strom, Wärme und Kraftstoff der mehr als sieben Milliarden Menschen weltweit basiert heute zu etwa 80 % auf fossilen Energien wie Kohle, Erdgas und Erdöl. Die Zahlen gelten in etwa auch in Deutschland und der Europäischen Union. Die intensive Nutzung verfügbarer fossiler Energieträger ist die Kernursache des Klimawandels. Unsere Mobilität heute – mit Ausnahme der Schienenfahrzeuge – basiert sogar zu 95 % auf fossilen Kraftstoffen. In Deutschland stammen nur etwa 5 % des Kraftstoffes (Biodiesel, Ethanol) aus erneuerbaren Quellen (s. Abb. S. 26 links).

Die Förderung von Erdöl ist traditionell auf wenige geografische Regionen begrenzt. Daraus resultieren enorme Abhängigkeiten, sowohl bei den Ländern, die Erdöl importieren müssen – in Deutschland sind das 98 % des benötigten Erdöls (s. Abb. S. 26 rechts) –, als auch bei den Exportländern, deren Staatshaushalte teilweise extrem vom Verkauf des Erdöls abhängen. Analog gilt dies auch für Erdgas und zunehmend auch für Kohle. In direktem Zusammenhang damit stehen die schon seit 100 Jahren andauernden globalen Konflikte um die Sicherstellung der Rohstoffverfügbarkeit.

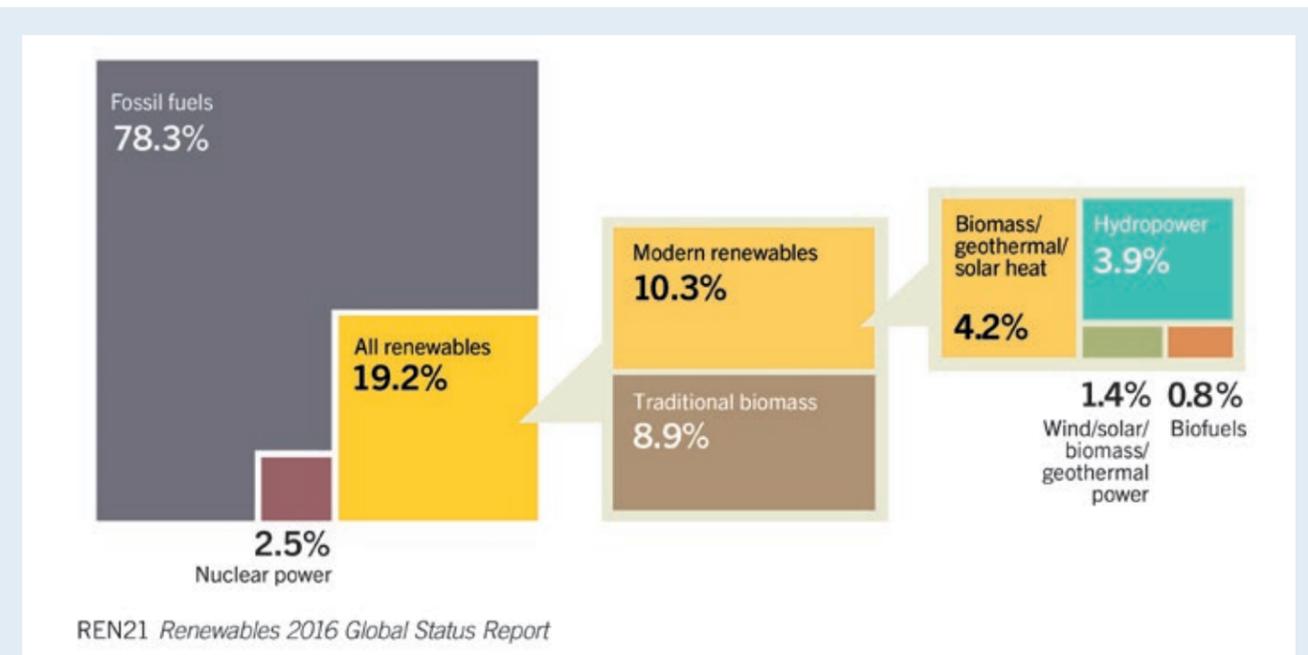
Gleichzeitig steigt der Kraftstoffverbrauch weltweit wie auch in Deutschland kontinuierlich an. Mehr als eine Milliarde Fahrzeuge, die auch ständig schwerer und größer werden und immer weitere Strecken zurücklegen, müssen mit Sprit versorgt werden. Und dann kommen künftig Länder wie Indien hinzu, die noch am Anfang des Ausbaus der individuellen Mobilität stehen.

## Renewable energy and e-mobility

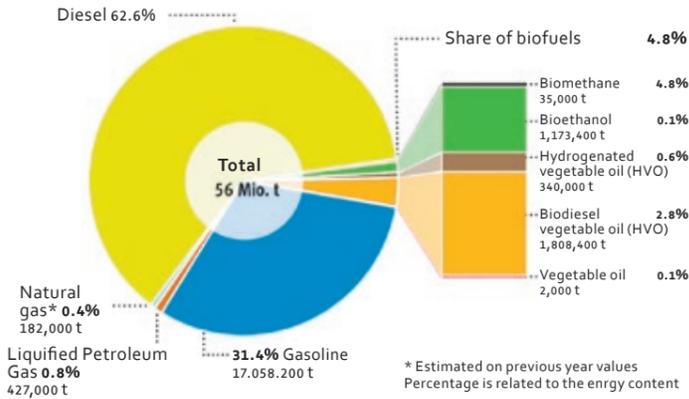
At present, almost 80% of the electricity, heat and fuel supplying our global population of more than seven billion people consists of fossil energy such as coal, natural gas and crude oil. These figures more or less also apply to Germany and the European Union. The high use of finite fossil energy sources is the the key cause of climate change. At present, fossil fuels power as much as 95% of our mobility – with the exception of rail transport. In Germany as little as 5% of all fuels are based on renewable sources (biodiesel, ethanol), (see fig. p.26 left).

The production of crude oil has traditionally been restricted a few geographic regions. This has led to huge dependencies, both among the oil-importing countries (Germany imports 98% of its crude oil demand, see fig. p.26 right) and among the exporting countries whose national budgets are extremely reliant on the sale of crude oil. The same applies to natural gas and, increasingly, coal. There is a direct connection between these dependencies and the commodity-related global conflicts that have been going on for 100 years – in order to secure the supply.

At the same time, fuel consumption is rising inexorably, both in Germany and worldwide. Over 1 billion vehicles, which are constantly increasing in weight and size and travel longer distances, require fuel. Compounding the problem are countries like India which are still at the beginning of their expansion into individual mobility.

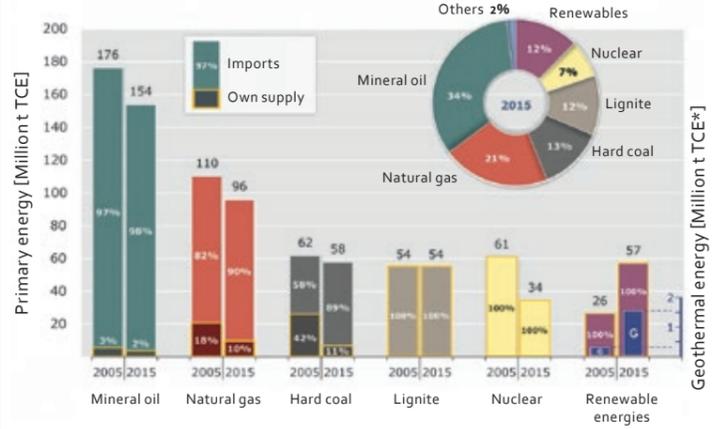


// Geschätzter Anteil erneuerbarer Energien am weltweiten Energieverbrauch 2014.  
// Estimated share of renewable energy in global energy consumption, 2014.  
Source: REN21 Renewables 2016 Global Status Report.



Source: FNR according BAFA, Destatis, DVFG, BMF (July 2016)

// Kraftstoffverbrauch in Deutschland 2015.  
 // Fuel consumption in Germany, 2015.  
 Source: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).



Source: BGR

// Importabhängigkeit und Selbstversorgungsgrad Deutschlands bei einzelnen Primärenergierohstoffen 2005 und 2015.  
 // Germany's import dependency and domestic supply levels for specific primary energy resources in 2005 and 2015.  
 Source: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, BGR).

Der Kraftstoffverbrauch in Deutschland ist seit 2011 um 3,3 Millionen Tonnen auf 56 Millionen Tonnen (2015) gestiegen. Gleichzeitig ist der Anteil an Biokraftstoffen von 5,6 % auf 4,8 % gesunken. Mit dem steigenden Verbrauch an fossilen Kraftstoffen nehmen auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen stetig zu – ganz im Gegensatz zu den Vereinbarungen, die im Dezember 2015 auf der COP21 in Paris getroffen wurden. So stiegen 2015 in Deutschland die CO<sub>2</sub>-Emissionen um etwa 8 Millionen Tonnen, anstatt zu fallen, um die vereinbarten Klimaziele zu erreichen (s. Abb. S. 27). Diese Faktoren zusammen zeigen, wie dramatisch die Situation in Bezug auf einen klimafreundlichen Verkehr ist.

Der Einstieg in die Elektromobilität ist dafür ein zentraler Lösungsansatz, allerdings nur, wenn der Strom aus regenerativen Quellen stammt. Die von der Bundesregierung geplante eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen bis 2020 würden etwa zwei Terawattstunden (TWh) Strom pro Jahr benötigen. Das entspricht etwa 0,3 % der heutigen gesamten jährlichen Stromerzeugung oder 1 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen (2016: 191 TWh). Im Jahr 2030 werden fast 140 GW an erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen installiert sein. Sollten in diesem Jahr sechs Millionen Elektrofahrzeuge unterwegs sein, dann würden sie 4 % des prognostizierten erzeugten erneuerbaren Stromes brauchen.

Der Ausbau der Elektromobilität kann in Zukunft auch einen nennenswerten Beitrag zum effizienten Management des Stromsystems leisten, indem Stromüberschüsse aus Wind und Sonne über intelligente Ladestrategien für die Batterie im Auto oder über den einfach speicherbaren Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge genutzt werden können.

Since 2011, fuel consumption in Germany has risen by 3.3 million tonnes to 56 million tonnes (2015). At the same time, the share of biofuels has declined from 5.6% to 4.8%. CO<sub>2</sub> emissions are rising in line with growing fossil fuel consumption – in contrast to the agreements passed at COP21 in Paris in December 2015. In 2015, CO<sub>2</sub> emissions in Germany rose by about 8 million tonnes instead of falling as would be necessary to ensure that the agreed climate targets is reached (see fig. p. 27). In terms of climate-friendly mobility, the combination of these factors shows how dramatic the situation really is.

The widespread market introduction of electric vehicles is a key approach to reduce CO<sub>2</sub> emissions, but only if the electric power is generated by regenerative sources. The one million electric cars on German streets by 2020, as planned by the federal government, would require around two terawatt hours (TWh) of electricity per year. This corresponds to approx. 0.3% of today's total annual electricity generation or 1% of the electricity generated from renewable sources (2016: 191 TWh). In 2030, nearly 140 GW of renewable electricity generation plants will be installed. If by then six million electric cars were on the roads, these cars would require 4% of the projected renewable electricity production.

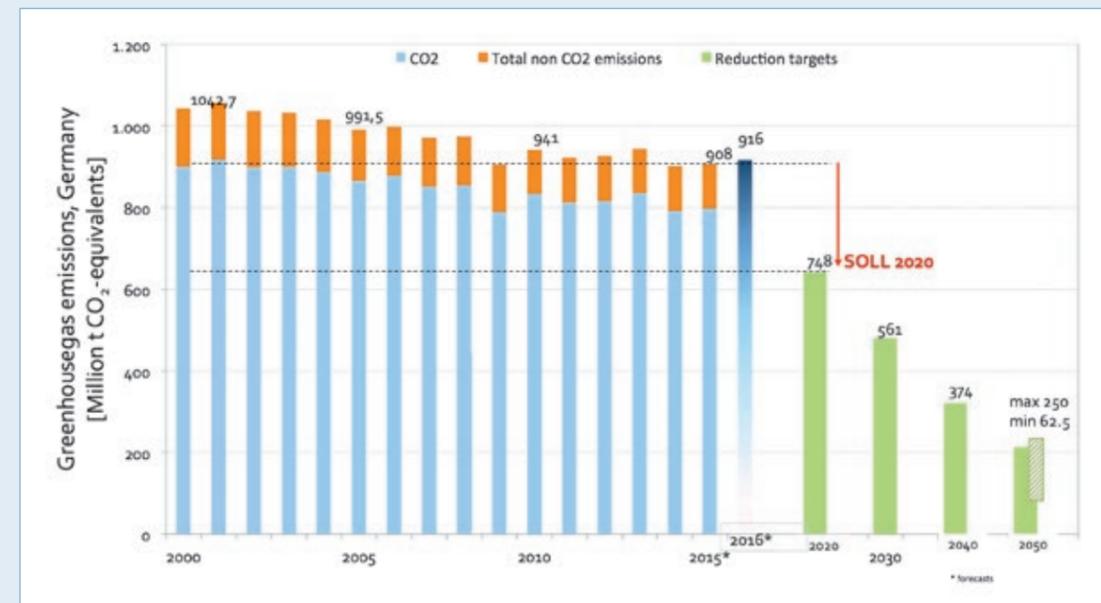
Based on the expected growth rates, electromobility will be a major contributor to an efficient energy management system by using excess power from wind and photovoltaics in combination with either smart charging strategies for car batteries or by producing easily storable hydrogen for fuel cell cars.

Das Erreichen der Ziele bei den Treibhausgasemissionen in Deutschland wird immer schwieriger (s. Abb. unten). Der von der Bundesregierung im Lichte des Klimaschutzabkommens von Paris entwickelte Klimaschutzplan bis 2050 setzt erstmals sektorspezifische Minderungsziele für die Treibhausgasemissionen für das Jahr 2030. Für den Verkehr ist das Ambitionsniveau mit einer Reduktion um knapp 40% gegenüber heute besonders hoch. Die Bedeutung des Verkehrssektors für den Klimaschutz nimmt sukzessive zu, da in anderen Sektoren wie der Stromerzeugung bereits erhebliche Fortschritte erzielt werden konnten, während die Emissionen im Verkehrssektor bislang nahezu unverändert auf dem Niveau von 1990 verharren. Auch die Europäische Union erhöht mit ihrem Vorschlag zur Festlegung verbindlicher nationaler Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021–2030 (Effort Sharing Regulation) den Druck auf die Bereiche außerhalb des Emissionshandels. Dem Verkehr kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, denn übersetzt man die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele in energiebezogene Ziele, so wird klar, dass im Verkehrssektor (trotz weiterhin steigender Verkehrsleistung) der Energiebedarf bis zum Jahr 2030 um ein Drittel reduziert werden muss. Das ist nur über eine zunehmende Elektrifizierung und die damit verbundenen Effizienzfortschritte möglich.

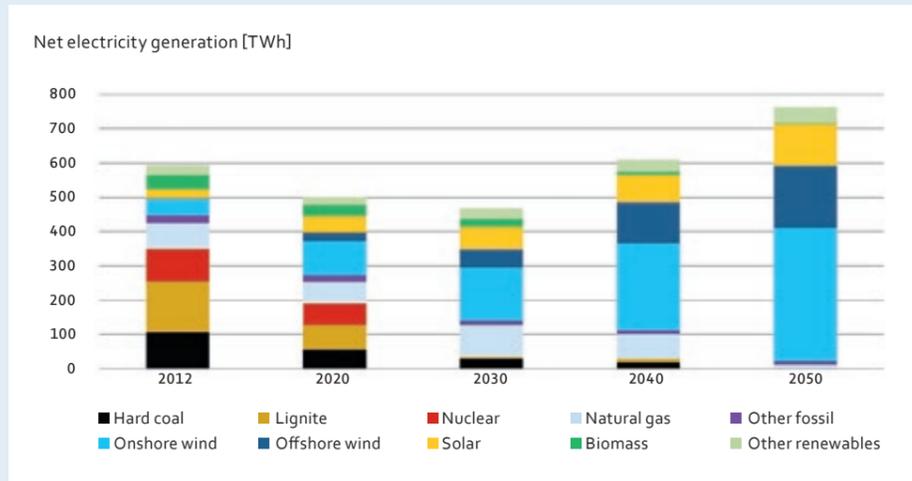
In Folge müssten im Jahr 2030 mindestens sechs Millionen Pkw über einen elektrischen Antrieb verfügen. Auch im Bereich der Nutzfahrzeuge und des Güterverkehrs ist die Verbreitung strombasierter Antriebsalternativen unumgänglich, da der Einsatz von

Meeting the targets for greenhouse gas emissions in Germany is becoming more and more challenging (see fig. below). For the first time, the German federal government's climate protection plan until 2050, which was developed in light of the Paris Climate Protection Agreement, has set sector-specific reduction targets for greenhouse gas emissions for the year 2030. In the transport sector, the target of nearly 40% reduction compared to today is particularly ambitious. The importance of the transport sector to climate protection is growing successively since significant progress has already been made in other sectors, for instance in the field of electricity generation, while emissions in the transport sector have remained almost unchanged since the 1990s. The European Union is also increasing pressure on areas outside emission trading by proposing binding annual national targets for the reduction of greenhouse gas emissions in the period 2021 to 2030 (effort-sharing regulation). Transport plays a key role in this context. If the CO<sub>2</sub> reduction targets are translated into energy-specific targets, it becomes clear that the energy requirement in the transport sector will have to be reduced by one third by 2030 (despite a further rise in transport capacity). This can only be achieved via increasing electrification and associated progress in the field of efficiency.

In consequence, six million cars would have to be powered by an electric drive in 2030. In the utility vehicle and goods transport fields, an expansion of electricity-based alternative drive systems



Die Treibhausgasemissionen in Deutschland steigen wieder. Entwicklung seit 2000 und Ziele für 2020 und 2030 (Quelle: Umweltbundesamt). Schätzungen für 2015 und 2016 (Quelle: AGORA Energiewende).  
 // Greenhouse gas emissions in Germany since 2000 and goals for 2020 and 2030 (Source: Umweltbundesamt). Estimates for 2015 and 2016. (Source: AGORA Energiewende).



// Nettostromerzeugung im Klimaschutzszenario 2050 (Klimaschutzszenario 95) nach Energieträgern 2012–2050, in TWh.  
 // Net electricity generation 2050 (Climate Protection Scenario 95) by energy carrier 2012 - 2050, in TWh.  
 Source: Öko-Institut und Fraunhofer ISI.



biogenen Kraftstoffen – die bislang dominierende Option des Einsatzes erneuerbarer Energien im Verkehrssektor – kaum über das heutige Maß hinaus steigerungsfähig ist.

Um beides, die Energiereduktionsziele und auch die Klimaschutzziele, zu erreichen, ist es zwingend erforderlich, im Verkehrssektor Strom aus erneuerbaren Energien einzusetzen. Es ist deshalb wichtig und richtig, dass der Ausbau der regenerativen Stromerzeugung sehr dynamisch fortgesetzt wird.

Im Klimaschutzszenario 95 (s. Abb. oben) ist ein äußerst ambitioniertes Ausbauszenario für die erneuerbaren Energien dargestellt. Das wäre auch notwendig, um in Deutschland die in Paris (COP21) vereinbarten Klimaschutzziele zu erreichen. Demnach müssten 2030 326 TWh (2016: 191 TWh) oder 70 % (2016: 32 %) des erzeugten Stroms aus erneuerbaren Energien kommen. Über eine intelligente Verknüpfung der Energieverbrauchssektoren mit der Stromerzeugung können neue Lastverschiebepotenziale erschlossen werden, wodurch die Nutzung der fluktuierenden Erzeugung aus Windenergie und Photovoltaik erleichtert wird. An das Stromnetz angeschlossene Elektrofahrzeuge können wie stationäre Batteriespeicher intelligent ge- und entladen werden und so zur Systemstabilität beitragen. Neben der direkten Verknüpfung mit dem Stromnetz können auch Elektrolyseanlagen, die aus erneuerbarem Strom Wasserstoff und ggf. weitere chemische Energieträger erzeugen, Schwankungen in der Stromerzeugung abfangen helfen, indem sie in Abhängigkeit vom Stromangebot eingesetzt werden. Die so erzeugten chemischen Energieträger können überall dort im Verkehrssektor eingesetzt werden, wo eine direkte Stromnutzung nicht möglich ist (z. B. Schiffs- und Flugverkehr, Teile des Schwerlastverkehrs).

is also indispensable, since the use of biogenic fuels – currently the dominating option for renewable energy in the transport sector – cannot be stretched much further beyond its current scope.

Use of renewable energy in the transport sector is of crucial importance in order to reach both the energy reduction targets and the climate protection targets. It is therefore important and necessary to continue with a very dynamic expansion of renewable power generation.

Although the Climate Protection Scenario 95 (see fig. above) is very ambitious, this level of expansion of renewable energies would be essential to meet the climate targets agreed upon at COP21 in Paris. Thus, 326 TWh (2016: 191 TWh) or 70% (2016: 32%) of the electricity will need to be produced by renewable energies in 2030. Smart linking of energy consumption sectors with the electricity generation sector can open up new load shift potentials which would facilitate the use of fluctuating wind and solar energy. Similar to stationary battery storage systems, electric cars which connect to the power grid allow for smart charging and discharging and thus contribute to increased system stability. Aside from their direct link with the electricity grid, electrolysis plants which generate hydrogen and, conceivably other chemical fuels made from renewable energy can help offset fluctuations in electricity generation if their use is coordinated with the available electricity supply. The resulting chemical fuels can be utilised in all areas of the transport sector where direct electricity use is not possible (e.g. shipping and aviation and certain heavy-load vehicle transport segments).

## Ausblick: Energiewandel bedeutet Strukturwandel

Der globale Strukturwandel nimmt mit all seinen Konsequenzen an Fahrt auf. Erneuerbare Energien sind auf dem Weg, die „fossile Welt“ bei der Stromerzeugung abzulösen. So wurden 2015 weltweit 285 Milliarden Dollar primär in Photovoltaik und Windenergie investiert, und das vorwiegend in Ländern wie China und den USA. Im gleichen Zeitraum lagen die Investitionen für fossile Kraftwerke nur noch bei 110 Milliarden Dollar.

Ein analoger Strukturwandel im Verkehrssektor hat gerade begonnen. Der weitreichende Ersatz von konventionellen Motoren- und Antriebstechnologien durch elektrische Antriebssysteme verlangt neues Know-how und neue Fertigungsprozesse. Neue Marktteilnehmer werden in Konkurrenz mit den bisher dominierenden Unternehmen treten und diese herausfordern. Das ZSW mit seinen umfassenden Forschungskompetenzen zu Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstoff unterstützt die Wirtschaft, damit sie den Strukturwandel erfolgreich bewältigen kann.

## Outlook: energy transition means structural change

Global structural change is picking up speed – with all its associated consequences. Renewable energies are on their way to replace the “fossil world” in power generation. In 2015, USD 285 billion were invested worldwide, primarily in photovoltaics and wind energy and mainly in countries like China and the USA. In the same period, investment in fossil power stations amounted to USD 110 billion only.

Structural changes in the transport sector have also only just begun. The far-reaching replacement of conventional engine and drive technologies with electric drive systems requires new know-how and new manufacturing processes. New market players will enter into competition with today’s dominating companies and provide fresh challenges. With its comprehensive research expertise in the fields of batteries, fuel cells and hydrogen, ZSW will support the industry to successfully manage these structural changes.

A blurred, low-angle shot of a crowd of people walking in a modern, brightly lit space, possibly a transit hub or a public square. The image is heavily motion-blurred, creating a sense of movement and activity. The color palette is dominated by cool blues and greens, with some warmer yellow and orange tones from the background lights. The overall atmosphere is dynamic and contemporary.

// Fachgebiete und  
Projekte

// Departments and  
Research Projects

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

### // Unsere Kernkompetenzen

Bei der UN-Klimakonferenz in Paris hat sich die Staatengemeinschaft zu einer Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C verpflichtet. Hierzu muss die weltweite Energieversorgung bis Mitte des Jahrhunderts vollständig auf den Einsatz fossiler Energieträger verzichten. Um das zu erreichen, müssen auf allen politischen Ebenen und in allen Sektoren des Energiesystems Entwicklungen angestoßen, gelenkt oder beschleunigt werden. Das interdisziplinär besetzte Fachgebiet Systemanalyse will diesen Transformationsprozess auf nationaler und internationaler ebenso wie auf regionaler Ebene gestalten und steht der Politik hierfür als verlässlicher, neutraler Berater zur Seite.

Neben zahlreichen Aktivitäten im Bereich des Monitorings auf Bundes- und Landesebene ist die Evaluation, Entwicklung und Begleitung der Implementierung von Förderinstrumenten (z. B. des Erneuerbare-Energien-Gesetzes) eine Kernkompetenz. Der Transformationsprozess wird auf allen Ebenen aktiv unterstützt: Beispiele sind der Wettbewerb „Leitstern Energieeffizienz“ (Kreisebene) oder das Projekt „Potenziale der Elektromobilität in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg“ (Verkehrssektor). Das Fachgebiet greift hierbei auf unterschiedliche Modelle und Analysetools zurück. Leistungsfähige Vorhersagesysteme für die Einspeisung von Wind-, Solar- und Wasserkraftstrom vervollständigen das Kompetenzprofil.

Zwei weitere Themenfelder befinden sich im Aufbau: Der Bereich Windenergie wird durch den Aufbau und den anschließenden Betrieb eines Testfelds in bergig-komplexem Gelände zusammen mit dem Forschungscluster WindForS erschlossen. Der Aufbau des Themenschwerpunkts Innovationsmanagement in Energiesystemen erfolgt im Rahmen des KOPERNIKUS-Projekts „Systemintegration“, das Teil eines langfristig angelegten Forschungsprogramms des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ist.

### // Our main focus

At the UN Climate Conference in Paris, the community of states committed itself to limit global warming to below 2 °C. This target can only be accomplished if all fossil energy sources are phased out by the middle of the century. To achieve this aim, developments must be initiated, steered and accelerated at all political levels and in all sectors of the energy system. In this context, the interdisciplinary Systems Analysis research department wants to support the transformation process on a national and international as well as regional level and is a reliable partner for political authorities.

Aside from numerous monitoring activities at the federal and state level, the department's core expertise also includes the evaluation, development and implementation of funding instruments (e.g. the Renewable Energy Act). The transformation process is actively supported at all levels: examples are the Leitstern Energieeffizienz (Guiding Star for Energy Efficiency) competition at the district level or the project 'Potenziale der Elektromobilität in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg' (Electromobility Potential in Commercial Fleets in Baden-Württemberg). Here the department makes use of various models and analytic tools. Sophisticated forecasting systems for wind, solar and hydroelectric power generation complete the department's range of expertise.

Two further areas are currently being set up: in conjunction with the WindForS research cluster, Systems Analysis is developing its wind energy expertise via the establishment and subsequent operation of a test field in complex mountainous terrain. The second area is "Innovation management in energy systems" in the context of KOPERNIKUS Project System Integration which is part of a long-term research programme run by the German Federal Ministry of Education and Research.



*„Die Energiewende ist aufgrund ihrer Komplexität auf umfassendes transformatives Wissen angewiesen. Für ihren Erfolg ist die Systemanalyse deshalb von großer Bedeutung, weil sie das bietet und entsprechende Impulse geben kann.“*

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt, Head of Department  
E-mail: maike.schmidt@zsw-bw.de, phone: +49 (0) 711 78 70-232

*“The energy transition depends on comprehensive transformative knowledge due to its complexity. Systems analysis is of great importance for its success because it offers just that and the corresponding stimulus.”*

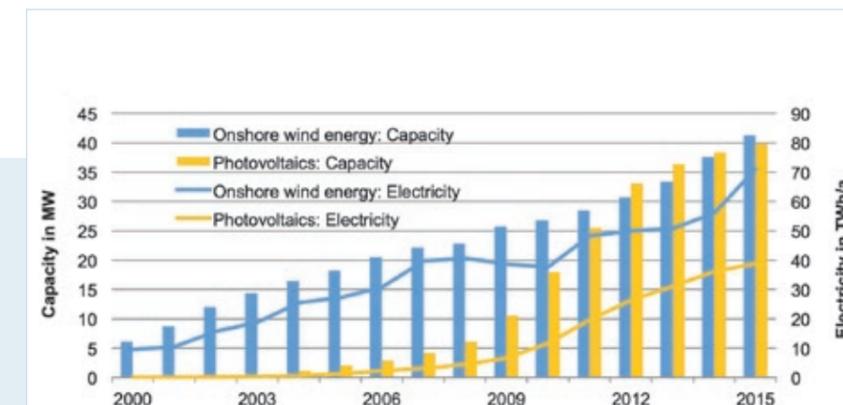


## // Evaluierung und Weiterentwicklung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes

Zusammen mit verschiedenen Projektpartnern unterstützt das Fachgebiet Systemanalyse in mehreren Vorhaben das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) bei der Evaluierung und Weiterentwicklung des Förderinstrumentariums für die erneuerbaren Energien im Stromsektor.

Mit der Umstellung des Fördersystems von administrativ festgelegten Vergütungssätzen auf ein wettbewerbliches Ausschreibungssystem durchläuft das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) derzeit einen grundlegenden Paradigmenwechsel. Was mit einer Pilotphase für Photovoltaik-Freiflächenanlagen begann, wird ab 2017 schrittweise fortgesetzt und auf weitere Technologien übertragen. Das Fachgebiet hat den gesamten Prozess und die Gestaltung des Ausschreibungsdesigns wissenschaftlich begleitet.

Neben der Umstellung auf Ausschreibungen unterstützt das Fachgebiet Systemanalyse das BMWi bei der Erstellung des EEG-Erfahrungsberichts. Die hierzu aufgelegten Forschungsprojekte dienen dem Zweck, der Bundesregierung bei der Erfüllung ihrer Berichtspflichten zu assistieren, die Regelungen im EEG 2014 und EEG 2017 zu evaluieren und Vorschläge zur Fortentwicklung der Rahmenbedingungen zu erarbeiten. Im Fokus der Arbeiten stehen die Sparten Photovoltaik und Windenergie an Land. Neben der Analyse der Marktentwicklung (s. Abb. unten) gehören vor allem Auswertungen zur Kostenstruktur und Wirtschaftlichkeit zum Aufgabenspektrum.



// Entwicklung der kumulierten installierten Leistung und Stromerzeugung von Windenergieanlagen an Land und Photovoltaikanlagen.  
// Development of cumulative installed capacity and electricity generation by onshore wind farms and photovoltaic systems.

// Tobias Kelm  
E-mail: tobias.kelm@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0) 711 78 70-250



## // Potenziale der Elektromobilität in gewerblichen Flotten in Baden-Württemberg (EMOgeFlott in BaWü)

Ziel des Projekts ist es, das im Land vorhandene, für die Elektromobilität erschließbare Potenzial in gewerblich genutzten Flotten und Flottenteilen zu ermitteln. Das Projekt wird im Rahmen des Programms „Nachhaltig mobil – Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis“ vom baden-württembergischen Verkehrsministerium gefördert.

Für die zur Elektrifizierung als geeignet identifizierten Flotten(-teile) wird mit dem Total-Cost-of-Ownership-Ansatz die Wirtschaftlichkeit konventioneller und elektrischer Fahrzeugvarianten verglichen. Die Ergebnisse der Gesamtkostenbetrachtung sollen klären, ob es bereits bestehende wirtschaftliche Einsatzmöglichkeiten der Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen gibt und in welchen Bereichen mit geringer politischer Intervention die Wirtschaftlichkeit erreicht werden könnte. Für die Einzelflotten/Flottenteile werden mögliche Mehrkosten identifiziert, analysiert und die Wirkung potenzieller zusätzlicher Förderansätze auf die Kostensituation untersucht.

Der Einsatz von Elektrofahrzeugen ist nicht nur aus Klimaschutzaspekten sinnvoll – sofern der eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energien stammt –, sondern kann auch zur Luftreinhaltung und Lärmemissionsminderung insbesondere im innerstädtischen Bereich beitragen. Daher erfolgt im Rahmen des Vorhabens für die ausgewählten Flotten auch eine Analyse des Emissionsminderungspotenzials. Aus den Ergebnissen der beschriebenen Analysen werden Kostenpotenzialkurven erstellt. Diese zeigen, in welcher Reihenfolge die vorhandenen Potenziale erschlossen werden sollten. Das fließt ebenso in die Empfehlungen zur Ausgestaltung von Förderinstrumenten ein wie die Ergebnisse eines Workshops zu weiteren Hemmnisfaktoren mit Stakeholdern aus der Praxis.

## // E-mobility potential in commercial fleets in Baden-Württemberg (EMOgeFlott in BaWü)

The project was launched to evaluate the e-mobility potential in commercial fleets and fleet sections in the state of Baden-Württemberg. The Baden-Württemberg Ministry of Transport is subsidising the project in the context of the 'Nachhaltig mobil – Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis' (Sustainable mobility – knowledge transfer from research to practical application) programme.

The total cost of ownership approach is used to compare the cost-effectiveness of conventional and electrical vehicle versions and is applied when considering the electrification of (partial) fleets. The results of the total cost of ownership studies will show whether some commercial applications for e-mobility are already cost-effective and in which areas cost effectiveness can be achieved with minimal political intervention. The project identifies and analyses potential additional costs for (partial) fleets and investigates the impact of potential additional subsidy approaches on the cost situation.

The use of electric vehicles makes sense, not only in terms of climate protection (if the electricity is generated from renewable sources) but also in terms of air quality and noise emission, especially in inner-city areas. Hence, the project also includes an emission reduction analysis of the selected fleets. The above analyses will form the basis for cost potential curves which will indicate the order in which the identified areas of potential should be exploited. These insights, as well as the results of a stakeholder workshop on further practical constraints, will be integrated into the recommendations for the design of the subsidy instrument.

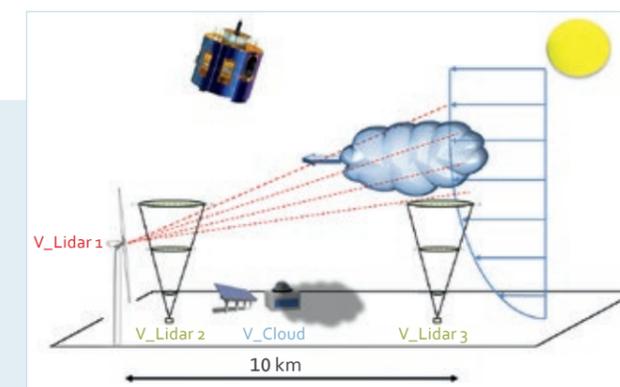
// Maïke Schmidt  
E-mail: maïke.schmidt@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-232



## // Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Kurzzeitvorhersage von Wind- und Photovoltaikleistung

Kurzzeitvorhersagen der Wind- und Photovoltaik(PV)-Leistung sind wichtige Parameter für die optimale Betriebsführung von regenerativen Kraftwerken in Energiesystemen. Das ZSW entwickelt hierfür im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhabens VORKAST die notwendigen Vorhersagen für den Zeitbereich 0–60 Minuten mit hoher zeitlicher Auflösung. Dabei kommen modernste Maschinenlernverfahren (Deep Learning) zum Einsatz.

Hierfür wurden für die PV-Leistungsprognose Daten auf dem ZSW-Freilandtestfeld Widderstall über ein Jahr hinweg erhoben. Dort erfasst eine Wolkenkamera mit 360°-Optik den Wolkenzug für die Berechnung der Einstrahlungs- und PV-Leistungsprognosen. Durch den Einsatz von tiefen neuronalen Netzen (Deep Neural Networks/DNN) mit Faltungsschichten (Convolutional Layers) können Merkmale automatisch aus den Bilddaten extrahiert werden. So entstehen z. B. für sich bewegende Wolken Merkmalsdetektoren, ohne dass sie manuell modelliert werden müssen. Die Qualität des Prognosesystems wird anhand von Messdaten einer Referenzzelle ermittelt. Für die Bewertung werden ausschließlich schwer vorhersagbare Situationen in einem unabhängigen Validationsdatensatz betrachtet. Die Modelle werden relativ zu einfacher Persistenz bewertet, welche einen Vorhersagefehler RMSE von 16,7 % bei Minute 10 erreicht. Die Anwendung eines Convolutional Neural Network (CNN) zur Verarbeitung von Wolkenbildern reduziert den Fehler auf 13,3 %. Der modulare Aufbau der im Rahmen des Projekts entwickelten Software ermöglicht die Einbindung beliebiger weiterer Datenquellen (wie Satelliten-, Lidar- oder Wettermodellldaten).



## // Development and application of “nowcasting” methods for wind and photovoltaic power generation

“Nowcasts” of wind and photovoltaic (PV) power generation represent important parameters for optimal operation management of regenerative power plants in energy systems. Within the framework of the research project VORKAST, which is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, ZSW is developing the required nowcasts for the 0-60 minute time period in high time resolution, using state-of-the-art deep learning methods.

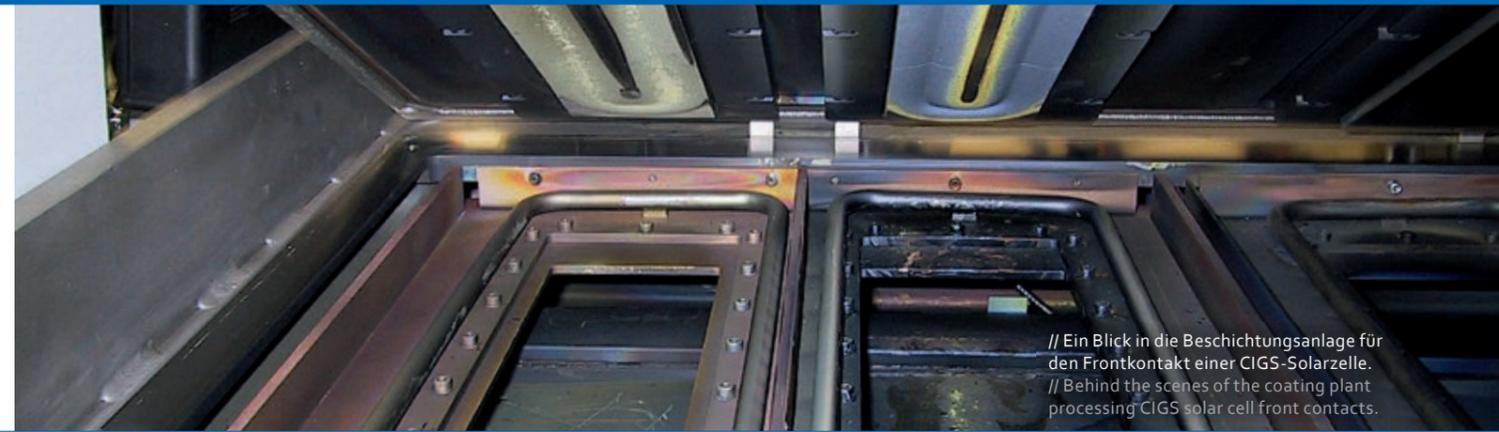
For the PV generation forecast, ZSW collected data at its Widderstall outdoor test facility over the period of a year. At the test facility, a cloud camera with a 360° optical lens records cloud movements to calculate irradiation and PV forecasts. The use of deep neural networks (DNN) with convolutional layers allows for the automatic extraction of characteristics from the image material. Characteristics detectors, for instance for cloud movements, are thus generated which do not require any manual modelling. Measurement data supplied by a reference cell are employed to determine the quality of this forecast system. The evaluation is based exclusively on situations which are difficult to predict and are modelled in an independent validation dataset. The models are evaluated in relation to simple persistence, which achieves an RMSE forecast error of 16.7% at minute 10. The use of the convolutional neural networks (CNN) for cloud image processing reduces the error to 13.3%. Thanks to the modular structure of the software developed in the project context, further data sources (for example, satellite, lidar or weather modelling data) can be integrated at will.

// Aufbau der Messanordnung für das VORKAST-Projekt.  
// Structure of the measuring system for the VORKAST project.

// Leon Schröder  
E-mail: leon.schroeder@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-337

# // Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

## Photovoltaics: Materials Research (MAT)



// Ein Blick in die Beschichtungsanlage für den Frontkontakt einer CIGS-Solarzelle.  
// Behind the scenes of the coating plant processing CIGS solar cell front contacts.

### // Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschicht-Technologien bietet für Photovoltaikmodule ein hohes Potenzial zur Kostensenkung. Insbesondere die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende CIGS-Technologie hat sich hier bereits in der industriellen Produktion bewährt. Im Fachgebiet MAT werden im Technikum CIGS-Module auf Glas mit einer Größe bis 30 x 30 cm<sup>2</sup> bzw. auf flexiblen Substraten mit einer Breite bis max. 30 cm auf beliebiger Länge im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt und in ihrer Funktionalität weiterentwickelt.

Die Anlagen zur Herstellung der CIGS-Module sind anders als in einem typischen Laborbetrieb weitgehend für Durchlaufprozesse und damit sehr nah an industriellen Verfahren ausgelegt. Aktuell werden auf Glassubstrat insbesondere im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Vorhabens CISProTec sowohl verbesserte als auch neue Prozesse für den Transfer in die Industrie erarbeitet. Anstelle des heute dominierenden Glassubstrats wird in einem zweiten Technikum der Einsatz von flexiblen Substratmaterialien wie Polymer- oder Metallfolien für die Rolle-zu-Rolle-Beschichtung erarbeitet. Neue organische und anorganische Halbleitersysteme wie Kesterite und Perowskite bieten das Potenzial, kostengünstige Drucktechnologien einzusetzen, und werden in einem eigenen Labor weiterentwickelt. Auch das Potenzial für zukünftige weitere Verbesserungen durch den Aufbau von Mehrfachzellen wird am ZSW erforscht.

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

### // Our main focus

Thin-film technologies show considerable potential for reducing the costs of photovoltaic modules. The CIGS technology based on copper, indium, gallium and selenium has proved to be particularly suitable for industrial production. At the ZSW technical lab, the MAT research department produces CIGS modules on glass in sizes of up to 30 x 30 cm<sup>2</sup> and applies the roll-to-roll method on flexible substrates in widths of up to 30 cm combined with any length, working to advance their functionalities.

In contrast to typical laboratory operations, the CIGS module production systems are largely engineered for in-line processes and hence closely mirror industrial processes. In terms of glass substrates, both new and improved processes are currently being developed for transfer to the industrial sector in the context of the CISProTec project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. In a second technical lab, roll-to-roll coating processes are being developed for flexible substrate materials, such as polymers or metal films, to replace the prevailing glass substrates. New organic and non-organic semiconductor systems such as kesterites and perovskites, which facilitate the use of cost-effective print technologies, are under development in a separate lab. ZSW is also researching the potential of further advancements based on multi-junction cell structures.

The MAT team's long-standing experience in developing and characterising CIGS solar modules is also being leveraged for industrial services: for our customers, we provide various material analysis services (e.g. high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis) or optical and electrical characterisation of cells and modules.

### // Mehr Licht für die Solarzelle

Für hocheffiziente Solarzellen soll der Frontkontakt der CIGS-Solarzelle möglichst viel Sonnenlicht bis zur absorbierenden CIGS-Schicht durchlassen und zusätzlich eine gute Leitfähigkeit für den Stromfluss aufweisen. Standardmäßig verwendet das ZSW eine Kombination aus CdS, undotiertem (i-ZnO) und mit Aluminium dotiertem ZnO (AZO), wie im schematischen Querschnitt (s. Abb. unten rechts) gezeigt. Damit erzeugen wir zwar bereits Solarzellen auf Weltrekordniveau, die Analysen zeigen aber noch optische Verluste in diesen Schichten. Daher werden alternative Materialien untersucht. So konnte etwa mit einer Zn(O,S)-Pufferschicht anstelle von CdS, aber ebenfalls im chemischen Bad abgeschieden, eine Rekordzelle mit 21,0 % Wirkungsgrad und verbesserter Stromerzeugung erzielt werden. Nun gilt es, die Spannung mit diesem Puffer anzuheben. Weitere Verbesserungen der Transparenz können wir durch den Ersatz der i-ZnO-Schicht durch Zinkmagnesiumoxid (Formel: (Zn,Mg)O, kurz ZMO) erzielen. ZMO lässt mehr blaues Licht als i-ZnO durch und verbessert die Stromsammlung in Kombination mit CdS oder Zn(O,S). ZMO wurde in der aktuellen Weltrekordzelle mit 22,6 % Wirkungsgrad verwendet.

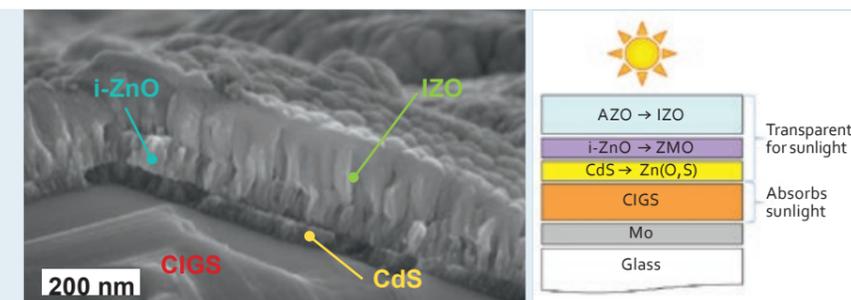
Die Anforderungen an die oberste Schicht sind hoch: eine hohe Transparenz bei hoher Leitfähigkeit. Hier wirkt sich die Schichtdicke in entgegengesetzten Richtungen auf die beiden Eigenschaften aus: Eine dünnere Schicht ist zwar transparenter, aber weniger leitfähig. Die Beschichtungsparameter für Standard-AZO wurden bereits optimiert. Derzeit werden alternative Frontkontakt-Schichten wie (In,Zn)O (IZO) getestet. Die Elektronen in diesem Material haben eine höhere Beweglichkeit, so dass auch bei dünneren Schichten eine ausreichende Leitfähigkeit erzielbar ist. Ein weiterer Vorteil des Materials ist eine deutlich erhöhte Stabilität gegenüber Feuchte. Mit diesem transparenten Kontakt konnten ebenfalls Rekordwerte bis 21,3 % erzielt werden.

### // More light for the solar cell

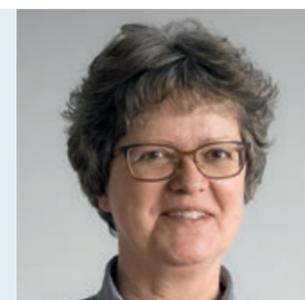
To ensure high efficiency, the front contacts on the CIGS solar cells must transmit a maximum of sunlight to the absorbing CIGS layer and also be highly conductive. A combination of CdS, undoped ZnO (i-ZnO) and ZnO doped with aluminium (AZO) as shown in the cross-section illustration (see fig. bottom right) is used as standard. This construction already allows us to produce world-record solar cells. However, since the analysis still indicates optical losses in these layers, we are researching alternative materials. For instance, using a Zn(O,S) buffer instead of CdS, both of which are deposited in a chemical bath, we produced a record cell with 21.0% efficiency and improved current generation. The next objective is a higher voltage using the alternative buffer. Further transparency improvements can be achieved by replacing the i-ZnO layer with zinc magnesium oxide (formula: (Zn,Mg)O, or ZMO for short). ZMO allows a higher transmission of blue light than i-ZnO and improves current collection in combination with CdS or Zn(O,S). ZMO was used in the current world-record cell with an efficiency of 22.6%.

The top layer has to meet stringent requirements: high transparency as well as high conductivity. The thickness of the layer has the opposite effect on the two properties: a thinner layer is more transparent but less conductive. We have already optimised the layer parameters for standard AZO. At present, alternative front contact layers, such as (In,Zn)O (IZO), are being tested. Electrons in this material have higher mobility, ensuring that sufficient conductivity is achievable even in thinner layers. A further advantage of the material consists of its significantly increased stability in humid conditions. A cell with this transparent contact also achieved record efficiencies of up to 21.3%.

// Elektronenmikroskopisches Bild der Kontaktschichten im Querschnitt.  
// A cross-section of the contact layers as imaged by the scanning electron microscope.



// Aufbau der CIGS-Solarzelle. Die obersten Schichten sollen möglichst lichtdurchlässig sein.  
// Structure of the CIGS solar cell. The top layers should let as much light through as possible.



*„Neben unserer ‚Paradedisziplin‘ der CIGS-Dünnschicht-Technologie, mit der uns 2016 wieder ein Weltrekord gelang, entwickeln wir erfolgreich Materialien für Solarzellen der nächsten Generation wie etwa die vielversprechenden Perowskite für Tandem-Anwendungen.“*

// Dr. Wiltraud Wischmann, Head of Department  
E-mail: wiltraud.wischmann@zsw-bw.de, phone: +49 (0)711 78 70-256

*“Aside from our ‘flagship discipline’ CIGS thin-film technology – a field in which we won another world record in 2016, we are also successfully developing materials for next-generation solar cells, such as the promising perovskite used in tandem applications.”*

// Dr. Theresa Magorian Friedlmeier  
E-mail: theresa.friedlmeier@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-293



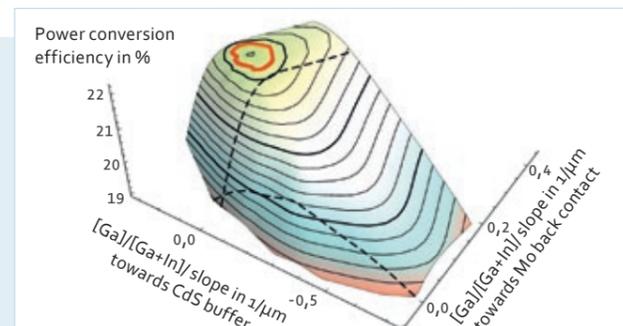
// CIGS-Kleinmodul mit 16 Zellen auf flexibler Edelstahlfolie.  
// Small-scale CIGS module with 16 cells on flexible stainless steel foil.

## // Optimierung von CIGS-Solarzellen mit Hilfe numerischer Simulationen

Mit steigenden Wirkungsgraden der CIGS-Technologie wird deren Verbesserung auf rein experimentellem Weg immer anspruchsvoller. Mit Hilfe physikalischer Solarzellenmodelle können äußerst komplexe Zusammenhänge dargestellt und verstanden werden. Dabei kommt ein breites Spektrum der am ZSW verfügbaren Messmethoden zum Einsatz. So kann etwa nach Bestimmung der Materialparameter in Abhängigkeit von der CIGS-Zusammensetzung mit Hilfe der Simulation der optimale [Ga]-Verlauf bestimmt werden. Geeignete [Ga]-Verläufe maximieren den Wirkungsgrad, sofern deren Steigungen zu den Kontaktflächen entsprechend groß werden und einen Schwellenwert nicht überschreiten. Darüber hinaus ist besonders der Halbleiter-Heterokontakt zwischen CIGS- und Pufferschicht interessant, dessen Eigenschaften maßgeblich zu hohen Wirkungsgraden beitragen.

## // Monolithisch verschaltete flexible CIGS-Module mit Rolle-zu-Rolle-Option

Für die Herstellung flexibler, monolithisch verschalteter CIGS-Dünnschicht-Solarmodule ist eine isolierende Trägerfolie notwendig, um die einzelnen Zellstreifen elektrisch zu separieren und in Serie zu verschalten. Für kostengünstige Rolle-zu-Rolle (R2R)-Prozesse im Temperaturbereich von  $\geq 600$  °C eignen sich insbesondere elektrisch isolierte Stahlfolien. Am ZSW wurden auf ultradünnen Edelstahlfolien Isolationsbarrieren abgeschieden, und mittels Laserstrukturierung konnten monolithisch verschaltete Kleinmodule mit Wirkungsgraden größer 11 % demonstriert werden (s. Abb. oben und unten). Die CIGS-Hochtemperaturabscheidung erfolgte nicht im R2R-Verfahren. Zur monolithischen Verschaltung auf 30 cm Bandbreite wird momentan die Integration einer P1-Laserstrukturierung zur Auftrennung des Rückkontaktes in die R2R-Vakuumanlage vorbereitet.



## // Optimisation of CIGS solar cells using numeric simulation

Improvement of the CIGS technology in the experimental context alone is becoming more difficult with rising efficiency. Extremely complex correlations have been illustrated and investigated with the help of physical solar cell models. The input data is supported by a wide range of measuring methods available at ZSW. For instance, once the material parameters have been determined in accordance with the CIGS composition, simulation can help determine the optimum [Ga] curve. Suitable [Ga] curves maximise efficiency, provided their slopes towards the front and back contacts are large enough without exceeding a certain threshold. Apart from this, the properties of the semiconductor heterocontact between CIGS and buffer are significant and contribute substantially to high efficiency.

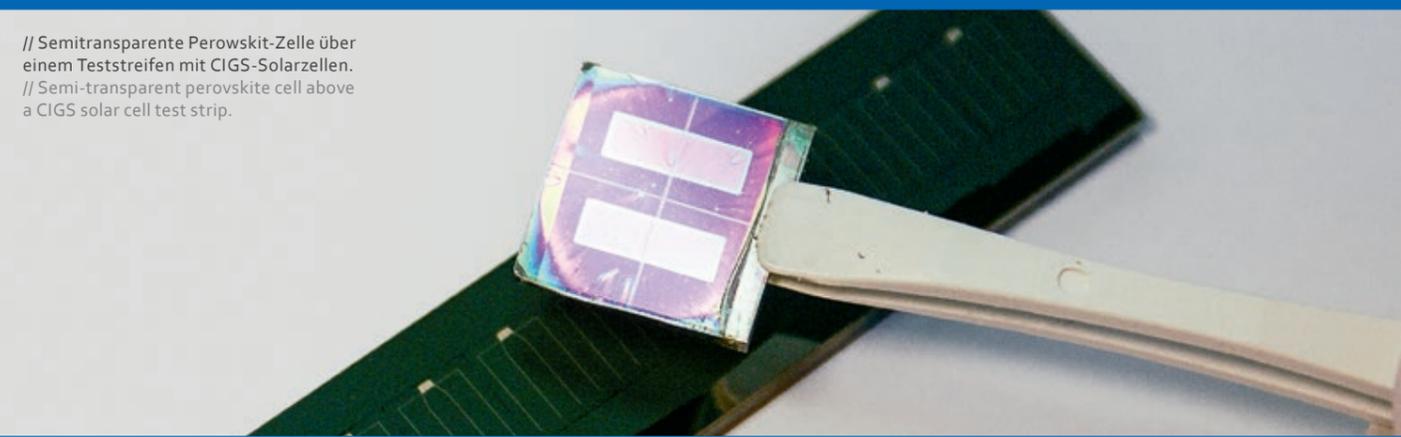
## // Monolithically interconnected flexible CIGS modules with roll-to-roll option

The manufacture of flexible, monolithically connected CIGS thin-film solar modules requires an insulating substrate foil in order to electrically separate the individual cell strips and connect them in series. Electrically insulated steel films are particularly suitable for cost-effective roll-to-roll processes (R2R) in a temperature range of  $\geq 600$  °C. At ZSW, insulation barriers have been deposited on ultra-thin stainless steel foil and monolithically interconnected small-scale modules with efficiencies above 11% have been demonstrated via laser structuring (see images above and below). The R2R method was not applied in the CIGS high-temperature deposition process. At present, ZSW is preparing the integration of a P1 laser structure for rear contact separation into the R2R vacuum system for monolithic interconnection on a 30 cm bandwidth.

// Optimale [Ga]-Profile mit Bezug auf ein [Ga]-Minimum weisen Steigungen zu beiden Kontaktflächen auf. Rot: experimenteller Referenzwert des Ausgangsmodells.  
// Optimal [Ga] profiles with reference to a [Ga] minimum show slopes towards both contact areas. Red: experimental reference value of the initial model.

// Dr. Ing. Andreas Bauer  
E-mail: andreas.bauer@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-231

// Dr. Friedrich Kessler  
E-mail: friedrich.kessler@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-201



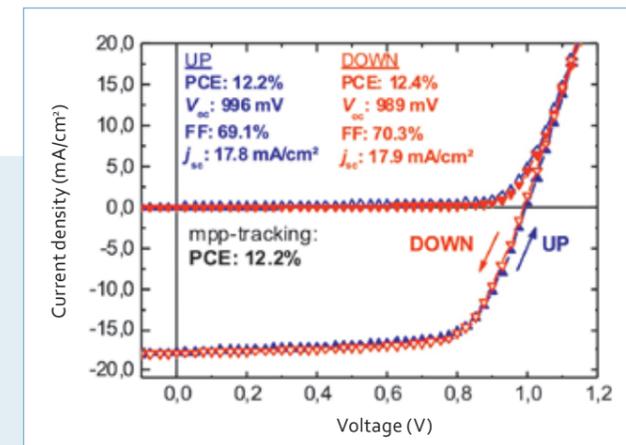
// Semitransparente Perowskit-Zelle über einem Teststreifen mit CIGS-Solarzellen.  
// Semi-transparent perovskite cell above a CIGS solar cell test strip.

## // Semitransparente Perowskit-Solarzellen für Tandem-Anwendungen

Sogenannte Organo-Halogenid-Perowskite bilden ein neues Dünnschicht-Photovoltaik-Material, mit dem in kürzester Zeit rasante Fortschritte im Wirkungsgrad mit einem aktuellen Rekordwert von über 22 % auf Zellgröße demonstriert werden konnten.

Wegen seiner hohen optischen Bandlücke von 1,55 eV ist das Material besonders interessant für semitransparente Anwendungen, bei denen noch möglichst viel Licht im sichtbaren Spektralbereich durch die Zelle hindurchkommen soll. Die Bandlücke kann durch Variation der Zusammensetzung eingestellt werden. Neben Anwendungen im Gebäude in Funktionsschichten für Fenster könnten solche Zellen in Zukunft speziell für Tandemkonzepte Bedeutung erlangen, bei denen eine semitransparente Zelle über eine CIGS-Solarzelle montiert wird, um das Sonnenspektrum in einem möglichst breiten Bereich auszunutzen und damit den Wirkungsgrad auf über 25 % steigern zu können (s. Abb. oben).

Das ZSW arbeitet seit 2016 in diesem Themenfeld im Rahmen zweier vom Bundesministerium für Bildung und Forschung bzw. dem Land Baden-Württemberg geförderter Forschungsprojekte. Es konnten bereits erste vielversprechende semitransparente Zellen mit über 12 % Effizienz bei einer Bandlücke von 1,55 eV realisiert werden, indem statt des üblichen metallischen Rückkontakts beidseitig transparente Kontaktschichten aufgebracht wurden (s. Abb. unten).



## // Semitransparent perovskite solar cells for tandem applications

So-called organohalide perovskites represent a new thin-film photovoltaic material that has allowed for the demonstration of rapid efficiency progress with a current record value of 22% at cell size.

Thanks to its high optical band gap of 1.55 eV, the material is particularly attractive in semitransparent applications that require a high transmission of light in the visible spectrum through the cell. The band gap can be adjusted via variations in the composition. Aside from building-integrated applications like functional window layers, such cells could become particularly relevant for tandem concepts in which a semitransparent cell is mounted over a CIGS solar cell in order to use the widest possible range of the solar spectrum and thereby increase efficiency above 25 % (see image above).

Since 2016, ZSW has been working in this field in the context of two research projects funded by the German Federal Ministry of Education and Research and the state of Baden-Württemberg. Initial promising semitransparent cells with efficiencies in excess of 12% and a band gap of 1.55 eV have been produced by applying transparent contact layers on both sides instead of the standard metallic rear contact (see fig. below).

// Die Probe zeigt eine Effizienz von 12,2 % mit nur sehr geringer Abhängigkeit von der Messrichtung (Hysterese).  
// The sample demonstrates an efficiency of 12.2% with very low dependency on the measurement direction (hysteresis).

// Dr. Erik Ahlswede  
E-mail: erik.ahlswede@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-247

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



### // Unsere Kernkompetenzen

Die Qualität und Stabilität von Photovoltaik(PV)-Modulen sowie der optimierte Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden Hauptthemenfelder des Fachgebiets MSA und seiner Kunden. Auf der Basis von über 25 Jahren Testerfahrung mit PV-Modulen aus kristallinem Silizium (c-Si) und aus Dünnschichtmaterialien werden im Modultestlabor Solab Untersuchungen zum Energieertrag sowie zur Langzeitstabilität durchgeführt. Für die Charakterisierung der Modulstabilität werden Resultate aus beschleunigten Alterungstests im Labor mit der zeitlich hochauflösenden Bestimmung von Degradationseffekten unter Freifeld-Betriebsbedingungen korreliert. So wird etwa die potenzialinduzierte Leistungsdegradation (PID) durch beschleunigte Alterung unter Hochspannung und bei Beleuchtung in der Klimakammer und im Freifeld untersucht. Zu unserer Beratungskompetenz gehören neben der Qualitätskontrolle von PV-Modulen und der Wirkanalyse von Störfaktoren (Klima, mechanische Belastung, Verschmutzung, elektrische Spannung) die Prüfungen von PV-Großanlagen und von PV-Produktionsstätten („Due Diligence“) im Auftrag finanzierender Banken, von Projektierern oder Betreibern.

Um den Wert der fluktuierenden regenerativen Energien zu erhöhen, befasst sich das Fachgebiet mit der intelligenten Steuerung von Lasten und Speichern, abhängig von vorhergesagten Lastprofilen und Erzeugungsprofilen aus Solar- und Windstrom. Dadurch erhöht sich die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen für Hauseigentümer und gewerbliche Anlagenbetreiber. Gleichzeitig kann die Netzbelastung reduziert und das Profil des vom Energieversorger zu beziehenden Reststroms aus Kostensicht optimiert werden. Das Fachgebiet berät bei der Entwicklung und dem Test entsprechender Algorithmen und Geräte.

### // Our main focus

The two main topics of the MSA research department and its clients consist of the quality and stability of photovoltaic (PV) modules and optimised utilisation of solar power in the energy system. Based on over 25 years of testing experience with PV modules made of crystalline silicon (c-Si) and thin-film materials, the Solab module test laboratory conducts energy yield and long-term stability tests. In order to characterise module stability, results from accelerated ageing tests in the laboratory are correlated with high-resolving degradation effects under outdoor operating conditions. Potential induced degradation (PID) is investigated using accelerated ageing under high voltage conditions with illumination in a climate chamber and under outdoor conditions. Aside from PV module quality control and impact analysis of interference factors (climate, mechanical loads, soiling and electrical voltage), our consultancy expertise includes inspections of large-scale PV installations and PV production facilities (due diligence) on behalf of financing banks, project developers and operators.

In order to increase the value of fluctuating renewable energy, the department deals with the smart control of loads and storage systems depending on predicted solar and wind power load and generation profiles. This results in increased cost-effectiveness of PV systems for both homeowners and commercial plant operators. At the same time, grid load is reduced, and the profile of the residual energy that must be purchased from the utilities can be optimised from a cost perspective. The department advises on the development and testing of corresponding algorithms and devices.

### // Internationales Consulting zur Qualitätssicherung von PV-Systemen

Das Fachgebiet MSA bietet seinen Partnern und Kunden kompetente Unterstützung bei der Qualitätssicherung entlang der ganzen Wertschöpfungskette – vom Photovoltaik(PV)-Modul bis zum Betrieb des PV-Parks. Dabei ist die fachgerechte Inspektion von Fertigungsstätten für PV-Module („Factory Inspection“) eine sinnvolle qualitätssichernde Maßnahme im Rahmen eines größeren Beschaffungsvolumens. Unter anderem wurden vom ZSW als unabhängigen Dritten Factory Inspections in China, Indien, Vietnam und Südafrika durchgeführt. Die Verteilung der Regionen spiegelt auch die Internationalisierung wider, die im Komponentengeschäft stattgefunden hat. Im Detail werden dabei die eingesetzten Materialien, die Produktionsprozesse und -anlagen sowie die Prozess-, Prüf- und Wartungsvorschriften überprüft und die Produktions- und Lagerflächen inspiziert.

Für einen PV-Park-Betreiber aus der Provinz Qinghai im Norden Chinas mit einem Portfolio von 3.000 MW auf 54 km<sup>2</sup> wurden bei einem Vor-Ort-Besuch Strategien für ein wirkungsvolles Park-Monitoring und schnelle Fehlerbehebung erarbeitet. Notwendig werden solche Consulting-Aufgaben, weil China in den letzten Jahren sehr schnell große PV-Kapazitäten aufgebaut hat, ohne auf ausreichend Erfahrung und personelle Ressourcen für den Parkbetrieb zurückgreifen zu können.

### // International consulting for PV system quality assurance

The MSA research department provides partners and clients with competent support in the field of quality assurance along the entire value-added chain, from PV module to the solar farm operation. The competent inspection of PV module production facilities (factory inspection) is an expedient quality assurance measure in the context of a larger procurement volume. ZSW has carried out independent third-party inspections of factories in China, India, Vietnam, South Africa and other countries. This regional spread also reflects the growing internationalisation of the component business. In particular, ZSW inspects materials, production processes, facilities, the process, control and maintenance provisions and the production and storage areas.

During an on-site visit, ZSW developed effective farm monitoring and error removal strategies for a PV farm operator in China's northern Qinghai province with a portfolio of 3,000 MW on 54 km<sup>2</sup> grounds. These consulting services have become necessary since China has swiftly established large PV capacities over the last few years without recourse to sufficient experience and staff resources to operate the farms.



*„Photovoltaik leistet als ideale Technologie einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende. Wir kümmern uns um die Qualität der Solarmodule und um die optimale Einbindung der Anlagen in dezentrale Energiesysteme.“*

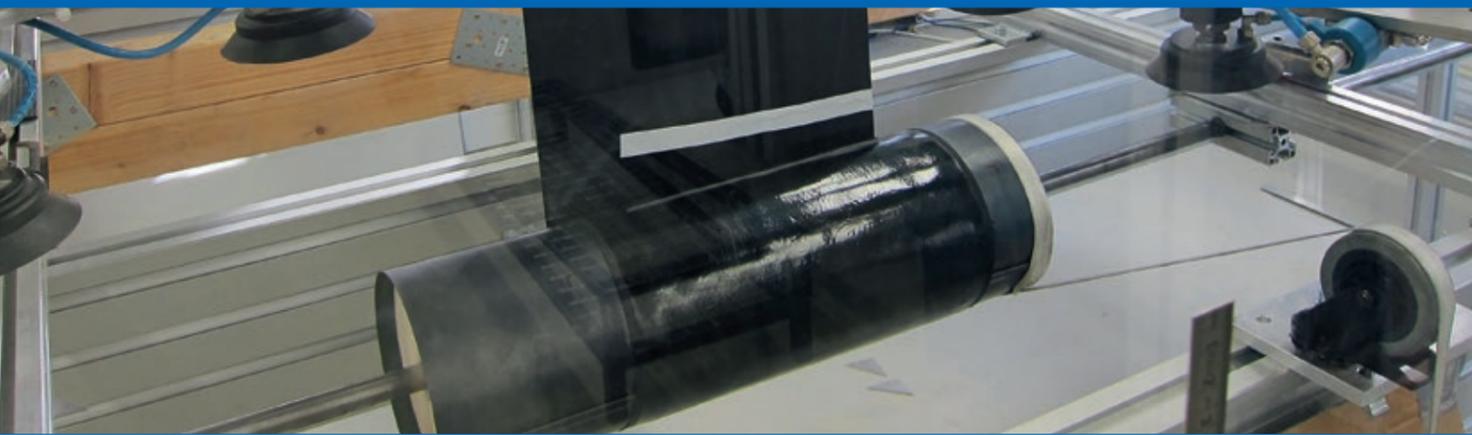
// Dr.-Ing. Jann Binder, Head of Department  
E-mail: [jann.binder@zsw-bw.de](mailto:jann.binder@zsw-bw.de), phone: +49 (0)711 78 70-209

*“Photovoltaics is an ideal technology that makes a decisive contribution to the energy transition. We see to the quality of the solar modules and to the optimum integration of the systems into decentralised energy systems.”*



// Inspektion eines chinesischen 850-MW-PV-Parks (oben und links).  
// Inspection of an 850-MW PV farm in China (above and left).

// Peter Lechner  
E-mail: [peter.lechner@zsw-bw.de](mailto:peter.lechner@zsw-bw.de)  
Phone: +49 (0)711 78 70-254

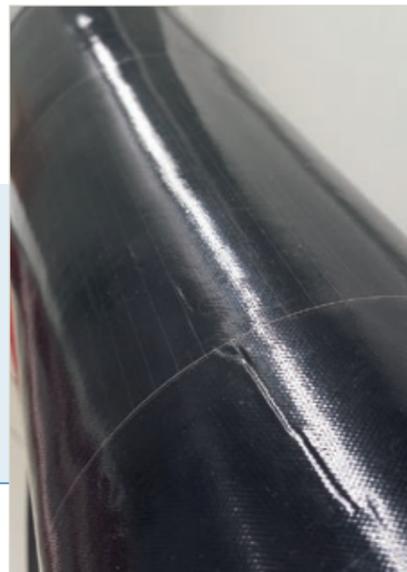


## // Entwicklung und Prüfung von leichten und rollbaren CIGS-PV-Textilien

Werden CIGS-Solarzellen mittels Rolle-zu-Rolle-Prozess auf dünne Polymer- oder Metallfolien aufgebracht, bieten sie das Potenzial für äußerst attraktive, flexible und rollbare PV-Produkte mit einer Effizienz, die der von heutigen Solarmodulen auf starren Substraten ebenbürtig ist.

In einem fachgebietsübergreifenden Projekt am ZSW wurde gezeigt, dass elektrisch voll funktionsfähige CIGS-PV-Folien direkt auf Trägertextilien auflaminiert werden können. Mit der Wahl der verwendeten Laminat- und Protektionsfolien lassen sich insbesondere Flächengewicht und Flexibilität beeinflussen. Es konnten PV-Textillamine mit einem Flächengewicht von unter 1 kg/m<sup>2</sup> realisiert werden, was einer spezifischen PV-Leistung von 100 bis 150 W/kg entspricht. Zum Vergleich leisten heutige kristalline Silizium-Standardmodule nur etwa 15 W/kg.

Darüber hinaus sind Tests zur Umweltbeständigkeit und Zuverlässigkeit wichtig, die auf die erwartete Produktlebensdauer in typischen Anwendungen und Einsatzorten abgestimmt sein müssen. Entsprechende Prüfaufbauten zum Dauertest der Rollbarkeit des Verbundsystems wurden definiert und im Testlabor Solab realisiert. Geeignet konstruierte CIGS-Textil-Materialverbände bestehen ohne jeglichen Leistungsverlust beispielsweise mindestens 500 Roll- und Biegezyklen. Beschleunigte Alterungstests in der Klimakammer bei Extremwerten von 85 °C und 85% relativer Luftfeuchtigkeit werden mehrere Tage lang unbeschadet überstanden.



## // Development and testing of light, rollable CIGS PV textiles

When CIGS solar cells are coated on thin polymer or metal foils via roll-to-roll processes, they can be processed into extremely attractive, flexible and rollable PV products with efficiencies potentially equal to those of current solar modules on fixed substrates.

An interdisciplinary project at ZSW has demonstrated that CIGS PV films with full electrical functionality can be laminated directly onto textile substrates. Surface weight and flexibility can be adjusted via the selected laminate and protection film. The project produced PV textile laminates with a surface weight of under 1 kg/m<sup>2</sup> which corresponds to a specific PV capacity of 100 to 150 W/kg. In comparison, current standard crystalline silicon modules achieve no more than 15 W/kg.

Tests of the modules' resistance to environmental stresses and reliability tests, which must be adjusted to the expected useful life depending on typical applications and installation sites, are also important. Corresponding test set-ups have been defined for endurance tests of the rollability of the composite system and have been realised in the Solab test laboratory. Suitably constructed CIGS textile composites, for instance, withstand a minimum of 500 roll and bend cycles without any loss of performance. They also survive several days of accelerated ageing tests in the climate chamber involving extreme conditions of 85 °C and 85% relative humidity without showing any damage.

// Auf- und Abspuldauertest eines CIGS-Textil-Verbundsystems (oben und links).  
// Coiling and uncoiling endurance test of a CIGS textile composite system (above and left).

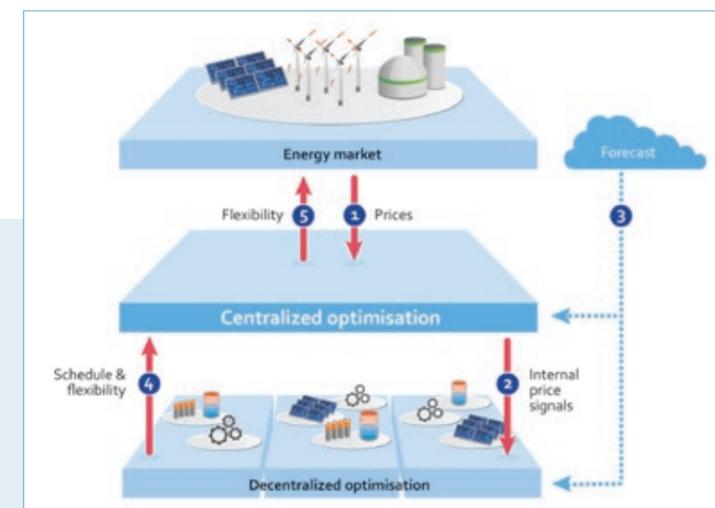
// **Peter Lechner**  
E-mail: peter.lechner@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-254



## // Optimierte Nutzung von erneuerbaren Energien im Quartier

Für das Energiemanagement von Quartieren ermöglicht eine mehrstufige Optimierung auf zentraler und dezentraler Ebene einen kostenoptimierten und systemdienlichen Betrieb von dezentralen Erzeugern, Lasten und Speichern. Dabei muss die zentrale Betriebsführung abhängig von den Energiebeschaffungskosten am Energiemarkt (s. Abb. unten) mit den intelligenten dezentralen Untereinheiten geeignet interagieren.

Gemäß dem Ansatz, möglichst viel Autonomie und Steuerungskompetenz bei intelligenten dezentralen Subsystemen (Gebäude mit Leittechnik, Kraft-Wärme-Kopplungs-, PV-Speichersysteme usw.) zu belassen, werden in einem der untersuchten Ansätze aus den Energiemarktpreisen (1) interne Preissignale (2) abgeleitet, anhand derer die dezentralen Einheiten ihren Betrieb optimieren. Die Untereinheiten leiten dabei unter zusätzlicher Beachtung der Anlageneigenschaften sowie von Last- und ggf. Ertragsprognosen (3) optimierte Fahrpläne für ihre Erzeugung und ihren Verbrauch ab. Diese Fahrpläne und Flexibilitätsschichten (4) werden an die zentrale Betriebsführung kommuniziert, welche prüft, ob das Ziel der Gesamtoptimierung erreicht wird. Durch Iteration des Verfahrens kann quasi ein interner Markt erzeugt werden, der die Energiebeschaffungskosten für das Gesamtsystem minimiert und durch Angebot von Lastverschiebepotenzialen (5) Einnahmen am Energiemarkt generiert. Bei geeigneter Vergütungsstruktur für Flexibilitäten verhält sich das Quartier dann auch systemdienlich.



## // Optimised use of renewable energy in districts

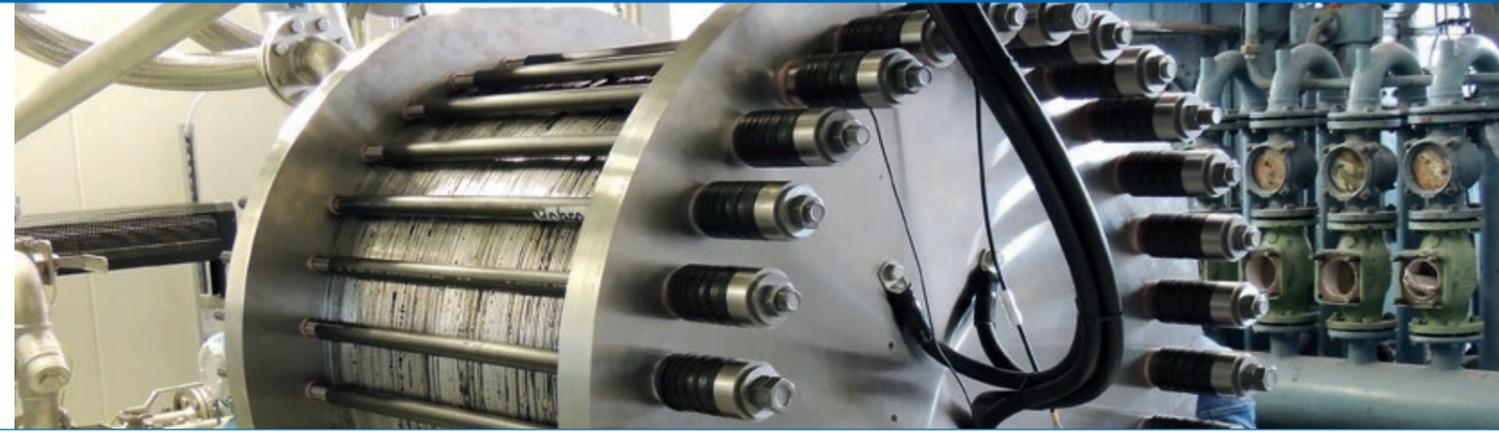
In the context of district energy management, multi-stage optimisation at the centralised and decentralised level allows for cost-optimised and system-compatible operation of decentralised producers, loads and storage facilities. Depending on the energy procurement costs on the energy market (see fig. below), central operations management must interact with the smart decentralised sub-units in an appropriate way.

In line with the approach of granting maximum autonomy and control authority to the smart decentralised sub-systems (buildings with control technology, CHP systems, PV storage systems and so on), one of the approaches under review utilises energy market prices (1) to deduce internal price signals (2) as the basis for the decentralised units to optimise their operations. In further consideration of the system properties, as well as the load and, where applicable, yield forecasts (3), the sub-units derive optimised production and consumption schedules. These schedules and flexibility ranges (4) are communicated to the central operations management which examines whether the overall optimisation goal is reached. Iteration of the process leads to the creation of a virtual internal market, minimises energy procurement costs for the overall system and generates income on the energy market by offering load shift potential (5). With a suitable tariff structure for flexibilities, the district will also act beneficial for the system.

// Zentrale und dezentrale Optimierung für den systemdienlichen Betrieb dezentraler Erzeuger, Lasten und Speicher im Quartier.  
// Centralised and decentralised optimisation for the system stabilising operation of decentralised producers, loads and storage facilities in districts.

// **Dr. Jann Binder**  
E-mail: jann.binder@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-209

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



// Drucktest mit 300-kW-AEL-Block.  
// Pressure test with the 300-kW AEL block.

### // Unsere Kernkompetenzen

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

Im Fachgebiet REG werden neue Technologien zur Herstellung von Synthesegas, Wasserstoff und Erdgassubstitut (SNG) entwickelt und im technischen Maßstab bis zu mehreren 100 kW erprobt. Neben der Elektrolyse, der Brennstoffreformierung und der Erzeugung strombasierter und biomassebasierter Synthesegase sind die Gasreinigung, die Gaskonditionierung sowie die Kraftstoffsynthese wichtige Aufgabengebiete. Zielsetzung im Themenfeld alkalische Elektrolyse ist insbesondere die Weiterentwicklung des Elektrolyseblocks und die Kostenreduktion der gesamten Wasserstoffherstellung durch Modularisierung der Systemkomponenten. Zielsetzung bei der Gasprozessertechnik ist die Erzeugung eines brennstoffzellentauglichen Gases, eines Brenngases für die Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstoffherzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz. Es wurden bereits zwei Power-to-Gas (P2G<sup>®</sup>)-Anlagen in den Leistungsklassen 25 kW<sub>el</sub> und 250 kW<sub>el</sub> am ZSW aufgebaut. An einer weiteren Anlage mit 6.000 kW<sub>el</sub> war das ZSW im Rahmen des Basic Engineerings sowie der Inbetriebnahme beteiligt und nimmt weiterhin das Anlagenmonitoring vor. Eine weitere Anlage in der Leistungsklasse von 1.000 kW<sub>el</sub> soll im Jahr 2018 im Rahmen des Leuchtturmprojektes „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ in Betrieb genommen werden.

### // Our main focus

The core expertise of the Renewable Fuels and Processes department is the production of renewable fuels, including motor fuels. We investigate and test ways to transform renewable energy into easily transportable and storable chemical energy carriers (fuels).

The REG department develops new technologies for the production of synthesis gas, hydrogen and substitute natural gas (SNG) and tests these on a pilot scale of up to several hundred kilowatts. Alongside electrolysis, fuel reforming and the production of syngas based on both biomass and electricity, our activities also focus on gas purification, conditioning and fuel synthesis. Particular objectives in the field of alkaline electrolysis are to develop electrolysis blocks and reduce the cost for overall hydrogen generation systems by means of modularising system components. Our aims in the area of gas processing technology are to produce a suitable gas for fuel cells, fuel gas for electricity generation, conditioned synthesis gas for fuel production and substitute natural gas to be distributed through the natural gas grid. Two Power-to-gas plants have already been built at ZSW in the 25 kW<sub>el</sub> and 250 kW<sub>el</sub> power classes. ZSW was also involved in the basic engineering and commissioning of another 6,000 kW<sub>el</sub> plant and monitors it on an ongoing basis. A further system in the 1,000 kW<sub>el</sub> power class will be commissioned in 2018 as part of the “Power-to-Gas Baden-Württemberg” flagship project.

### // Alkalische Druckelektrolyse für P2G<sup>®</sup>-Anwendungen

Seit 2013 arbeitet das Fachgebiet REG im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekt „P2G<sup>®</sup>-Elektrolyse“ an der Entwicklung eines eigenen innovativen Konzepts zur alkalischen Druckelektrolyse (AEL).

Das neue 1-MW-Druckelektrolyse-Anlagensystem wurde fertiggestellt und vom TÜV Süd formal abgenommen. Die Anlage ging Ende 2016 mit einem 300-kW-Block in Betrieb und wurde bis zu den vorgesehenen Betriebsgrenzen von 15 bar<sub>g</sub> Druck und einer Temperatur von 75 °C bei einer Stromdichte von 0,6 A/cm<sup>2</sup> getestet. Der 300-kW-Block ist eine Eigenentwicklung des ZSW, die sich durch Zellrahmen aus vulkanisiertem Kunstkauschuk mit integrierten Stützblechen auszeichnet.

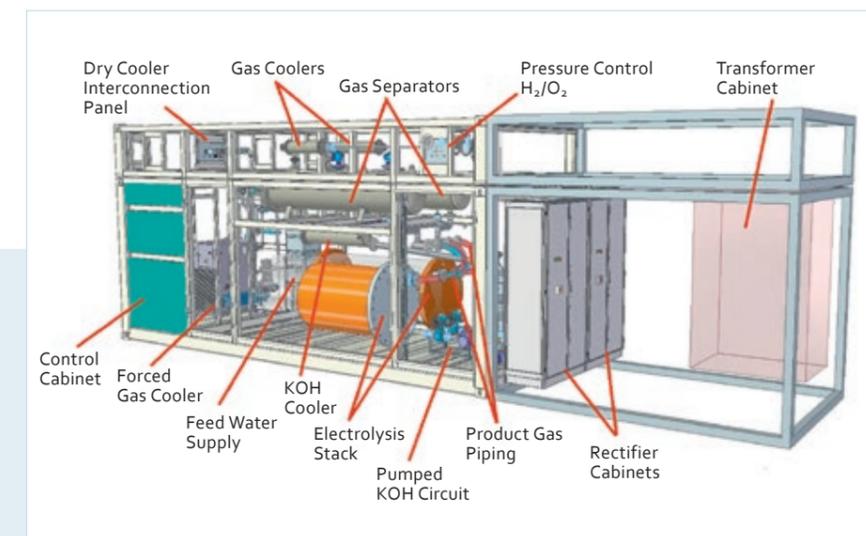
Mit der Inbetriebnahme wurden alle übergeordneten P2G<sup>®</sup>-Elektrolyse-Projektziele – eigenes Block- und modulares Systemkonzept, hocheffizientes Gleichrichtersystem, SIL (safety integrity level)-fähige Produktgasüberwachung, angepasstes Betriebs- und Sicherheitsüberwachungssystem – nach vier Jahren Laufzeit erreicht.

### // Alkaline pressurised electrolysis for P2G<sup>®</sup> applications

Since 2013, the REG department has been working on the development of an innovative in-house alkaline pressurised electrolysis (AEL) concept within the framework of “P2G<sup>®</sup> Electrolysis”, a joint project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

The new 1 MW pressure electrolysis plant system was completed and formally accepted by TÜV Süd. The system was commissioned with a 300-kW block at the end of 2016 and was tested up to the planned operating pressure limit of 15 bar<sub>g</sub> and at a temperature of 75 °C with a current density of 0.6 A/cm<sup>2</sup>. The 300-kW block is a ZSW in-house development, characterised by cell frames of vulcanised synthetic rubber with integrated support plates.

Commissioning meant that all the higher-level goals of the P2G<sup>®</sup> Electrolysis project – a dedicated block and modular system concept, highly efficient rectifier system, SIL-compatible (safety integrity level) monitoring of the product gas and tailored operational and safety monitoring system – had been achieved after a project period of four years.



// 3-D-Ansicht des AEL-Demonstrators.  
// 3D view of the AEL demonstrator.

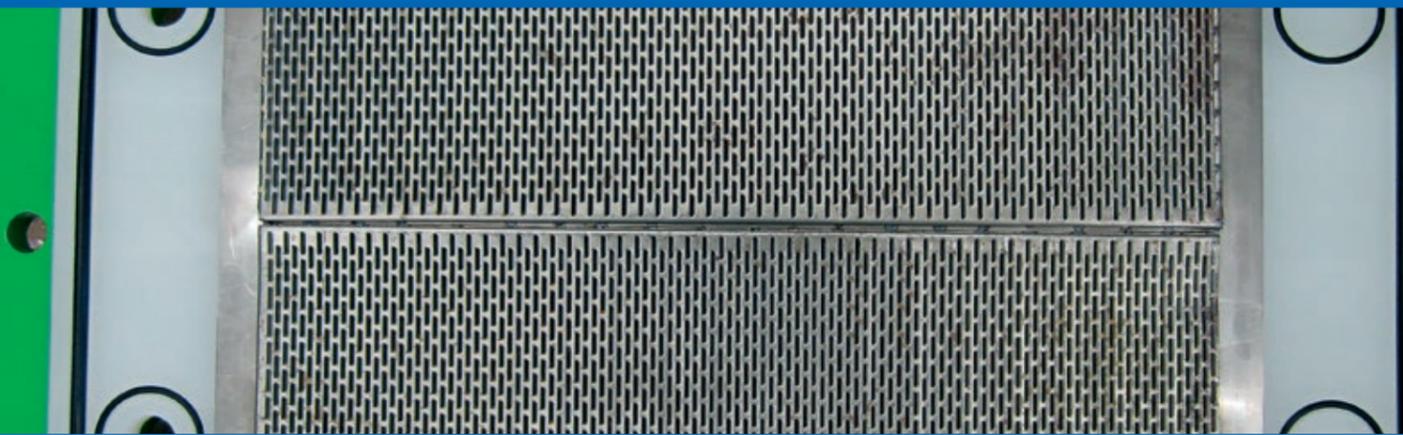


„Ohne regenerative, strombasierte Kraftstoffe (eFuels) wird die Energiewende nicht gelingen.“

// Dr. Michael Specht, Head of Department  
E-mail: michael.specht@zsw-bw.de, phone: +49 (0)711 78 70-218

“The energy transition will not succeed without renewable e-fuels.”

// Andreas Brinner  
E-mail: andreas.brinner@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-338



// Innenansicht einer Einzelzelle des neu entwickelten ecoPtG-Short-Stacks.  
// View into a single cell of the newly developed ecoPtG short stack.

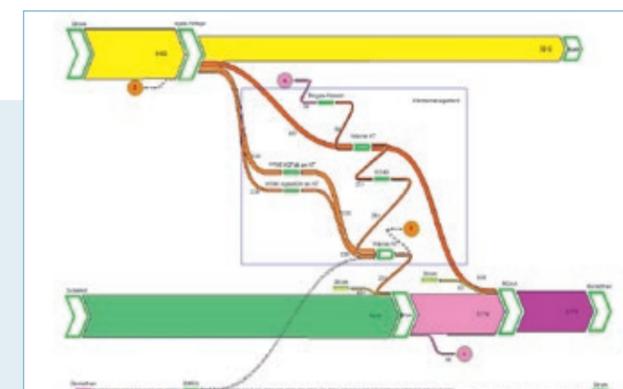


## // WOMBAT Power-to-Gas (P2G®)

Im Rahmen des im September 2016 abgeschlossenen, vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit geförderten vierjährigen Projekts WOMBAT (Wirkungsgrad-Optimierung Methanisierungs- und Biogas-Anlagen-Technologie) wurde an der ersten industriellen Power-to-Gas-Anlage (6 MW) eines Automobilherstellers in Werlte (Niedersachsen 2013) ein Monitoring-System zur Erfassung sämtlicher Stoff- und Energieströme aufgebaut. Die Anlage konvertiert regenerativen Strom, aus dem via Wasserelektrolyse Wasserstoff gewonnen wird, und klimaneutrales CO<sub>2</sub> aus einer Biogasanlage zu regenerativem Methan (s. Abb. oben).

Die Anlage verfügt über ein komplexes Wärmemanagementsystem (s. Abb. unten), das es ermöglicht, mit der Abwärme aus der Elektrolyse und der Methanisierung die unterschiedlichen Wärmeverbraucher der Biogasanlage zu versorgen. Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem Biogas erfolgt mittels Aminwäsche, wobei die Regeneration der CO<sub>2</sub>-beladenen Aminlösung thermisch erfolgt. Die Synergien zwischen P2G®-Anlage und Biogas(aufbereitungs)anlage wurden ebenfalls zieloptimiert genutzt. Durch die wärmetechnische Verschaltung der beiden Anlagen erreichten die Projektpartner eine signifikante Verbesserung des Gesamt-Outputs an nutzbarem Methan.

Mit den ermittelten Daten und Analysen konnte an der Biogasanlage durch entsprechende Maßnahmen der CH<sub>4</sub>- und der CO<sub>2</sub>-Output verstetigt und gesteigert werden, während gleichzeitig der Wirkungsgrad erhöht sowie der Methanschlupf und die Treibhausgasemissionen deutlich gesenkt wurden. Im Rahmen von WOMBAT wurden zudem verschiedene Treibhausgasreduktions-Szenarien entwickelt, bei denen in den nächsten Jahrzehnten ein Markt für Power-to-Gas entsteht.



## // WOMBAT Power-to-Gas (P2G®)

As part of the four-year WOMBAT project funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, a monitoring system for recording all material and energy flows was installed on the first industrial Power-to-Gas plant (6 MW) dating from 2013 at an automotive company in Werlte in Lower Saxony. The project was completed in September 2016 and aimed to optimise the efficiency of methanisation and biogas plant technology. The plant converts renewables-based electricity to regenerative methane using hydrogen gained via water electrolysis, and climate neutral CO<sub>2</sub> from a biogas plant (see image above).

This plant has a complex heat management system that helps to supply process heat to the various heat consumers in the biogas plant with waste heat from electrolysis and methanisation (see fig. below). CO<sub>2</sub> is removed from the biogas by means of amine scrubbing, and the CO<sub>2</sub>-containing amine solution is thermally regenerated. Optimal use has also been made of the synergies between the P2G® system and the biogas (treatment) system. By heat integrating the two systems, the project partners were able to achieve a significant improvement in the overall output of usable methane.

The CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> outputs of the biogas plant were consolidated and increased by implementing suitable measures as determined through experimental data analysis. At the same time, efficiency was increased and emissions of leaked methane and greenhouse gases were significantly reduced. As part of the WOMBAT project, various greenhouse gas reduction scenarios were also developed that involve the establishment of a market for Power-to-Gas in the coming decades.

// Sankey-Diagramm des Wärmemanagementsystems zwischen P2G®-Anlage und Biogas(aufbereitungs)anlage.  
// Sankey diagram of the heat management system shared by the P2G® system and biogas (treatment) plant.

// Dr.-Ing. Ulrich Zuberbühler  
E-mail: ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-239

## // Neues Elektrolyseprojekt macht Power-to-Gas wirtschaftlich

Wie mit Hilfe von Großserienkomponenten aus dem Fahrzeugbau kostengünstig Wasserstoff hergestellt werden kann, erforscht das ZSW zusammen mit Partnern aus Forschung und Industrie. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts „ecoPtG“ entwickeln die Forscher und Ingenieure einen alkalischen Wasserelektrolyseur mit einer Leistung von 100 Kilowatt. Damit wollen sie die wirtschaftliche Herstellung von CO<sub>2</sub>-neutralem Wasserstoff demonstrieren und die Speicherung von Strom ermöglichen (s. Abb. unten).

Bisher standen die hohen Investitionskosten gerade bei kleineren Elektrolyseuren einer Markteinführung im Wege. Das Projekt „ecoPtG“ soll das ändern: Durch ein einfaches Konzept, vereinfachte Fertigungsverfahren und günstige Materialien wie Kunststoff soll die geplante alkalische 100-Kilowatt-Elektrolyse fit für den Markt werden. Um das zu erreichen, nutzen die Projektpartner vor allem die Erfahrungen der Automobilindustrie. Im Fokus stehen dabei die Leistungselektronik, Steuerung und Sensorik sowie verfahrenstechnische Komponenten, etwa für die Temperierung und Medienkreisläufe. Viele dieser Komponenten werden für Autos mit verschiedenen Antriebstechniken günstig in Großserie hergestellt und erfüllen zugleich die Anforderungen der Elektrolyse. Im Rahmen von „ecoPtG“ wird geprüft, wie der Technologietransfer genau erfolgen kann.



// Neu entwickelter ecoPtG-Short-Stack im Versuchsbetrieb im ZSW-Labor.  
// Experimental operation of the newly developed ecoPtG short stack in the ZSW laboratory.

## // New electrolysis project aims to make Power-to-Gas commercially viable

ZSW is working together with partners from research and industry to investigate how hydrogen can be produced in a cost-effective manner using high production volume components from the automotive industry. As part of the “ecoPtG” project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, researchers and engineers are developing an alkaline water electrolyser with an output of 100 kilowatts. They aim to demonstrate that CO<sub>2</sub>-neutral hydrogen can be produced in a cost-effective manner, thus facilitating a method of storing electrical energy (s. fig. below).

Up to now, high investment costs were a barrier to market entry, especially for smaller electrolysers. The “ecoPtG” project aims to change this situation: the goal is to facilitate the commercial viability of the planned alkaline 100-kilowatt electrolysis process by employing a straightforward concept, simplified production processes and affordable materials such as plastics. To achieve this aim, the project partners are primarily harnessing experience from the automotive industry. The focus here is on power electronics, control and sensor technology and production process components for temperature control and fluid circuits, for example. Many of these components, which also meet electrolysis requirements, are mass-produced cost-effectively for vehicles with various drive technologies. The “ecoPtG” project aims to investigate methods of transferring these technologies to hydrogen production.

// Stefan Steiert  
E-mail: stefan.steiert@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)711 78 70-257

## // 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 Supercapacitoren. Kernkompetenz ist die Entwicklung maßgeschneiderter Pulver. Rund 30 Jahre Materialforschung bilden die Basis für unser umfangreiches Verständnis der Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien wie Hochvoltspinelle, Lithiumübergangsmetallphosphate und -silikate und Anodenmaterialien (z. B. optimierte Kohlenstoffmodifikationen, Titanate und Legierungsanoden) für Lithium-Ionen-Batterien wird intensiv an neuen Elektrolytsystemen mit speziellen Additiven und an Elektrodenmaterialien für zukünftige Systeme wie Lithium/Schwefel und Lithium/Luft geforscht.

Im Labormaßstab können wir Prototypen im Format 18650 und gestapelte Pouchzellen für Forschungszwecke herstellen. Ziel der Entwicklungen sind angepasste vorindustrielle Fertigungsprozesse für neuartige, leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Zellgenerationen. Bisher gefertigte Zellen mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Zyklenstabilität (> 17.000 Zyklen). Ein weiterer Fokus liegt auf der Prozessierung von Hochenergieelektroden mit wässrigen Bindersystemen und auf der Entwicklung von Zellen mit Hochvoltspinellen.

Zur Schadensanalyse und für die Bewertung neuer Zellen sind wir auf Post-mortem-Analysen spezialisiert. Die Analyseergebnisse sind essenziell für das Verständnis von Alterungsprozessen und potenziellen Sicherheitsrisiken sowie für die Zelldesignoptimierung.

### // Our main focus

The work of the ECM department traditionally focuses on synthesising and characterising functional materials for batteries and supercapacitors with core expertise in the development of custom powders. 25 years of material research provide the basis for our comprehensive understanding of the interaction between structure and powder morphology, on the one hand, and the desired functional and processing properties, on the other. In addition to new cathode materials such as high-voltage spinels, lithium transition metal phosphates and silicates as well as anode materials (for example as optimised carbon modifications, titanates and alloy anodes) for lithium-ion batteries, new electrolyte systems with special additives and electrode materials are being researched for future systems such as lithium/sulphur and lithium/air.

Prototypes can be researched on laboratory scale with cells in 18650 format and stacked pouch cells. The goal is to develop new and high-performing components for future cell generations that can be adapted to industry. Our cells consisting of in-house developed electrodes show very high reproducibility and cycling stability (>17,000 cycles). A current focus is the processing of high-energy electrodes with aqueous binder systems and the development of cells consisting of high-voltage spinel cathode materials.

We are specialised in the area of post-mortem analysis to understand failures in battery components and evaluate new cells. The analytical results are essential for understanding ageing processes, potential safety risks and to optimise cell design.

## // Langlebige Fahrzeugbatterien: MAT<sub>4</sub>BAT Projekt

In dem dreieinhalbjährigen EU-geförderten Vorhaben MAT<sub>4</sub>BAT forscht das ZSW gemeinsam mit 16 internationalen Partnern. Ziel des Projekts ist die Entwicklung von langlebigen Batterien mit hoher Energiedichte, die besonders für automotiv Anwendungen eine wichtige Rolle spielen.



Im Projekt übernimmt das ZSW eine führende Rolle bei der Erkennung von Alterungsmechanismen auf Materialebene mittels Post-mortem-Analysen. Die Alterungsuntersuchungen von großformatigen Zellen unter verschiedenen Bedingungen ergaben, dass die Alterung vor allem auf der Anodenseite stattfindet. Beispielsweise kann sich bei ungünstigen Betriebsbedingungen metallisches Lithium auf den Grafitanoden abscheiden (s. Abb. unten), wodurch die Zellebensdauer und das Sicherheitsverhalten negativ beeinflusst werden. Um diese Lithiumabscheidung nachzuweisen, wurde am ZSW eine neuartige und schnelle Methode (GDOES) entwickelt. Um den Alterungsmechanismus der Lithiumabscheidung zu unterdrücken, wurden günstige Betriebsfenster beispielhaft für kommerzielle 16-Ah-Zellen ermittelt, die eine deutliche Verbesserung der Zyklenstabilität erlauben.

## // Long-life automotive batteries: Project MAT<sub>4</sub>BAT

In the 3.5-year MAT<sub>4</sub>BAT project funded by the EU, ZSW has been working together with 16 international partners. The aim of this project is the development of long-life batteries with a high energy density – key features for automotive applications.

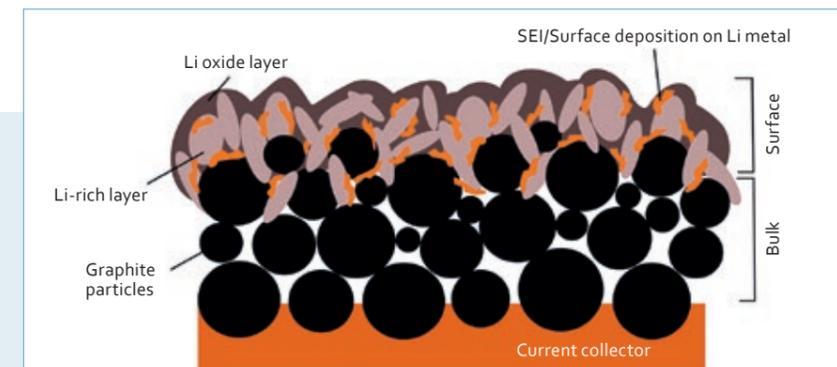
In this project, ZSW is leading the work for post-mortem analyses to detect ageing mechanisms on the materials level. After ageing tests with large-scale cells aged under different conditions, one main result of the project is that ageing takes place mainly on the anode side. For example, under unfavourable operating conditions, metallic lithium can be deposited on graphite anodes (see fig. below), which is detrimental both to lifetime and safety properties. In order to detect metallic Li on graphite anodes, ZSW developed a fast and innovative method (GDOES). To suppress the ageing mechanism of lithium deposition, favourable operating conditions were determined for commercial 16-Ah cells, thereby enabling a significant improvement of cycle life.



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

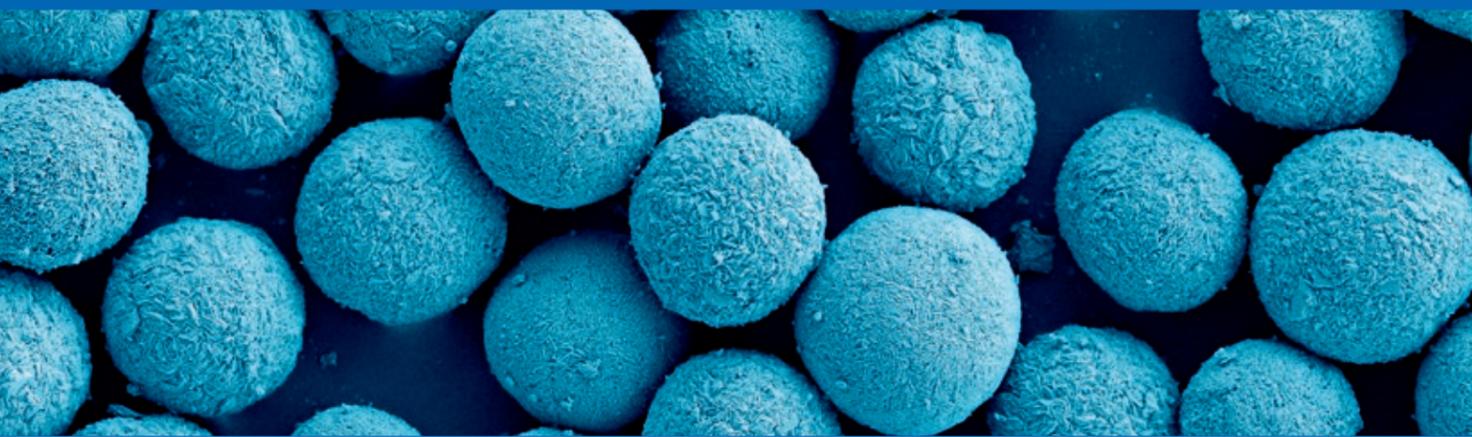
// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens, Head of Department  
E-mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de, phone:+49 (0)731 95 30-612

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



// Modell der Lithiumabscheidung auf Grafitanoden.  
// Model of lithium deposition on graphite anodes.

// Dr. Thomas Waldmann  
E-mail: thomas.waldmann@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-212



// REM-Aufnahme eines neuartigen, kobaltfreien Kathodenmaterials.  
// SEM image of an innovative, cobalt-free cathode material.

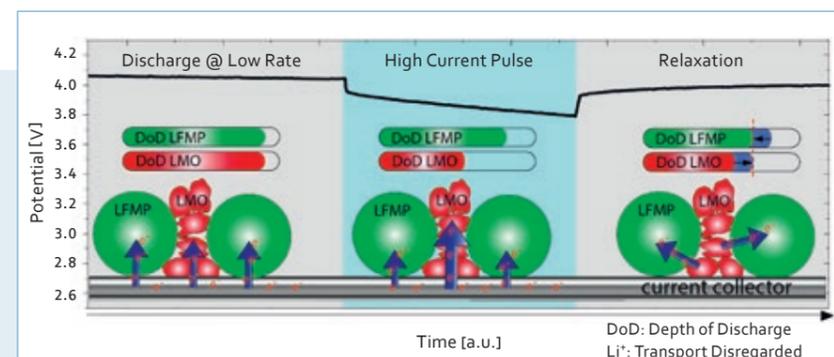
## // Neue Materialien für Lithium-Ionen-Batterien

Innerhalb des Verbundprojekts „Li-EcoSafe“ arbeiten Wissenschaftler von ZSW, DLR, HIU und der Universität Ulm an der Entwicklung neuer Speicherkonzepte, die leistungsstärker, sicherer und kostengünstiger sein sollen. Koordinator ist das ZSW, die Förderung erfolgt durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der „Excellent Battery Initiative“. Nach drei Jahren intensiver Arbeit konnten nun drei sehr vielversprechende Konzepte identifiziert werden.

Es gelang ein neuartiges kobaltfreies (Co-freies) Kathodenmaterial zu entwickeln (s. Abb. oben), das gegenüber herkömmlichen Materialien eine deutlich höhere Energiedichte bei vergleichbarer Sicherheit aufweist. Zudem konnten Naturgraphite über mechanische Rundungsprozesse veredelt und Grafitabfallprodukte für die Nutzung als Anodenmaterial erschlossen werden.

Elektrodenseitig gelang es, Lithiumeisenmanganphosphat (LFMP) und Lithiummanganspinell (LMO) zu neuartigen leistungsstarken und sicheren nickel- und kobaltfreien Blend-Elektroden zu kombinieren, deren Belastungsverhalten sogar die theoretisch berechneten Werte übertrifft. Diese synergetischen Effekte konnten durch mechanistische Untersuchungen verstanden und ein Modell abgeleitet werden (s. Abb. unten).

Alle drei Ansätze steigern die Performance bei gleichzeitiger Vermeidung kritischer Ressourcen oder energieintensiver Prozesse. Die Projektergebnisse aus den ersten drei Jahren wurden vom BMBF als so vielversprechend bewertet, dass nun eine Verlängerung um zwei weitere Jahre bewilligt wurde. Aufgabe dieser zweiten Förderperiode wird es sein, die drei gewählten Ansätze in Batteriezellen zu implementieren.



// Erklärungsmodell zur Wirkungsweise des LFMP/LMO-Blend-Elektrodenkonzepts.  
// Explanatory model to describe the LFMP/LMO blended electrode concept.

// Dr. Peter Axmann  
E-mail: peter.axmann@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-404

## // New materials for lithium-ion batteries

As part of the joint project Li-EcoSafe, scientists from ZSW, DLR, HIU and the University of Ulm are working on the development of storage system concepts to make lithium-ion batteries safer, cheaper and more efficient. The project is being coordinated by ZSW, with funding granted by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of the “Excellent Battery Initiative“. After three years of extensive work, three very promising concepts have been identified.

An innovative cobalt-free cathode material was developed (see image above), which has a significantly higher energy density with a comparable level of safety as compared to conventional materials. In addition, natural graphites were successfully refined with mechanical rounding processes, and graphite waste products were put to use as anode materials.

On the electrode side, lithium iron manganese phosphate (LFMP) and lithium manganese spinel (LMO) were combined to form innovative, high-performance, safe, nickel- and cobalt-free blended electrodes, whose loading behaviour even exceeded the theoretically calculated values. These synergistic effects were understood using mechanistic investigations, and a model was then derived (see fig. below).

All three approaches improved performance while avoiding critical resources or energy-intensive processes. BMBF considered the project results from the first three years so promising that an extension of two years has now been granted. The goal during this second funding period will be to experimentally validate these three chosen approaches in battery cells.

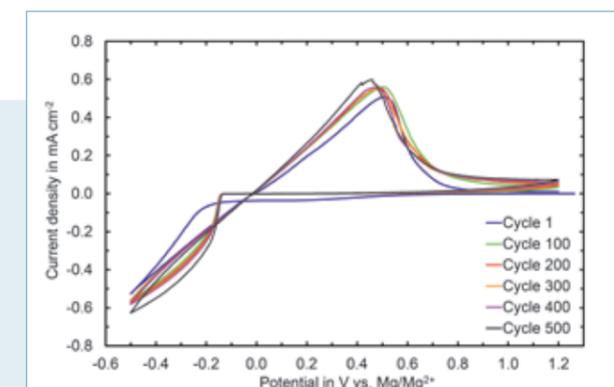


## // Magnesiumbatterien und Magnesium-Luft-Batterien

Weltweit laufen intensive Anstrengungen, um sogenannte „Post-Lithium-Ionen-Batteriesysteme“ als Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln, die bessere Materialverfügbarkeit, geringere Kosten und höhere Energiedichten versprechen. Am ZSW werden im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts seit 2013 Magnesiumbatterien (Mg-Batterien) und Magnesium-Luft-Batterien erforscht. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Mg-Luft-Elektrode sowie für die Mg-Metall-Elektrode geeignete Elektrolyte.

Die Mg-Luft-Kathode ist hochkomplex und bisher nur unvollständig verstanden. Um dem Abhilfe zu schaffen, werden über elektroanalytische Verfahren (wie Voltammetrie an der rotierenden Ring-Scheiben-Elektrode, s. Abb. oben), spektroskopische und andere Methoden die Sauerstoff-Reduktions- und -Oxidationsreaktion sowie Nebenreaktionen während des Entladens und Ladens in verschiedenen Elektrolyten systematisch untersucht.

Die Herausforderung für die Mg-Metall-Anode ist es, Elektrolyten zu finden, die die Elektrode nicht vollständig passivieren. Klassischerweise kommen halogenidbasierte Systeme zum Einsatz, die allerdings aufgrund ihrer hohen Reaktivität an anderen Stellen in der Zelle Probleme verursachen können. Mit Magnesocen [Bis(cyclopentadienyl)magnesium] konnte eine völlig neue halogenidfreie Elektrolytklasse gefunden werden, die eine Mg-Abscheidung und -Auflösung mit hoher Reversibilität ermöglicht (s. Abb. unten). Die anodische Stabilität ist für Magnesocen auf ca. 1,6 bis 1,8 V vs. Mg/Mg<sup>2+</sup> beschränkt. Zurzeit wird versucht, diese durch geeignete Funktionalisierung zu steigern und die Elektrolytklasse für praktische Mg-Batteriesysteme fit zu machen.



## // Magnesium batteries and magnesium-air batteries

Worldwide, efforts are underway to develop so-called post-lithium ion battery systems as an alternative to lithium-ion batteries, which promise better materials availability, lower costs and higher energy densities. At ZSW, magnesium (Mg) batteries and magnesium-air batteries have been researched since 2013 as part of a project sponsored by the German Federal Ministry of Education and Research. The focus is on Mg-air electrodes and on electrolytes suitable for Mg-metal electrodes.

The Mg-air cathode is highly complex and only partially understood. To remedy this situation, the oxygen reduction and oxidation reaction, as well as secondary reactions during the discharging and charging processes in various electrolytes are being systematically investigated by means of electroanalytical methods (such as voltammetry on the rotating ring-disc electrode, see image above), spectroscopic methods and other methods.

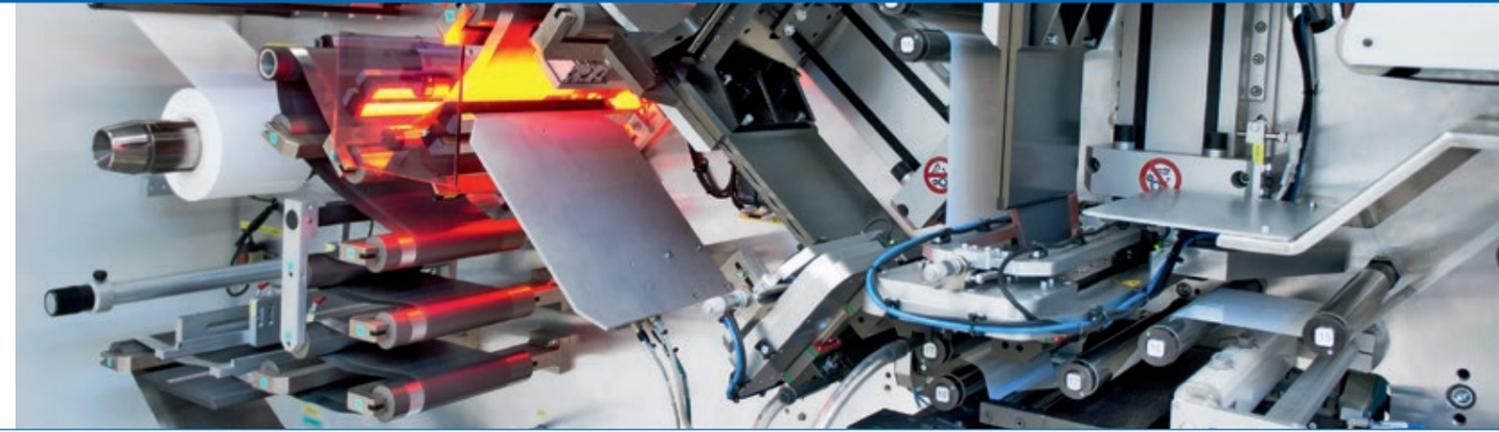
The challenge for the Mg-metal anode is to find electrolytes that do not passivate the electrode completely. Halide-based systems are normally used, which may cause problems at other sites in the cell due to their high reactivity. With magnesocene [bis(cyclopentadienyl) magnesium], an entirely new halide-free electrolyte class was found that allows for Mg deposition and dissolution with high reversibility (see fig. below). Anodic stability is limited to about 1.6 to 1.8 V for Magnesocene vs. Mg/Mg<sup>2+</sup>. At present, attempts are being made to improve stability through a suitable functionalisation and to further develop the electrolyte class for application in practical Mg battery systems.



// Mg-Abscheidung und -Auflösung aus einem Magnesocen-basierten Elektrolyten. Links: Zyklovoltammetrisches Experiment (50 mV/s, Cu-Substrat). Rechts: Morphologie des abgeschiedenen Mg.  
// Mg deposition and dissolution in a magnesocene-based electrolyte. Left: cyclic voltammetry experiment (50 mV/s, Cu substrate). Right: morphology of the deposited Mg.

// Dr. Mario Wachtler  
E-mail: mario.wachtler@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-403

## // Produktionsforschung (ECP) Production Research (ECP)



### // Unsere Kernkompetenzen

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

Im Fokus unserer Arbeit 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, >20 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 Fragen zur Evaluierung der 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 hochqualifizierte und erfahrene Team, bestehend aus Technikern, Ingenieuren und Elektrochemikern, aufgrund der Betriebserfahrung mit der FPL mittlerweile über wichtige Beratungskompetenzen bezüglich der Zellfertigung und auch zu Kostenbetrachtungen.

### // Our main focus

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

Our work focuses on operating a pre-competition “Research platform for industrial production of lithium-ion cells (FPL)”, which maps the near-production overall manufacturing process for hard-case cells (PHEV 1-cell, >20 Ah). This focuses on studies of the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in terms of quality, reliability and manufacturing costs as well as inline 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 all production steps, right up to quality assurance processes. In addition to this, the highly qualified and experienced team of technicians, engineers and electrochemists, now has crucial consulting expertise on cell manufacturing and cost considerations, based on operation of the FPL.

## // Intelligente Li-Ionen-Batterien in der Fertigung und Anwendung

Die mobile Speicherung von elektrischer Energie mit leistungsfähigen Batterien stellt eine der Schlüsseltechnologien für die Energieversorgung im 21. Jahrhundert dar. Die hohe Leistungs- und Energiedichte, die gute Zyklenstabilität und Lebensdauer machen Lithium-Ionen-Batterien zu optimalen Kandidaten für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen.

Insbesondere in der Herstellung sind großformatige Lithium-Ionen-Zellen aber schon bei kleinsten Fehlern extrem störanfällig. Obwohl die Prozessparameter während der Produktion bereits genauestens dokumentiert werden, sind viele Fehler erst durch den Einsatz der Batterie nachweisbar. Eine Überwachung des Innenlebens der Batterie während der Formierung und des Einsatzes ist momentan nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich, wäre aber von großem Vorteil. In dem vom baden-württembergischen Wirtschaftsministerium geförderten Projekt Smart-LIB wurden erstmals Lithium-Ionen-Zellen im PHEV-1-Format mit internen Sensoren (T, V) ausgestattet und einem Belastungstest unterzogen. Die gesammelten Sensordaten konnten über einen Infrarottransmitter kabellos an einen externen Empfänger übertragen und so der „Gesundheitszustand“ der Zelle (SOH, State-of-health) in Echtzeit überwacht werden. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, um kritische Batteriezustände frühzeitig zu erkennen und einen Ausfall im Feld zu vermeiden.

## // Smart lithium-ion batteries in manufacture and application

Mobile storage of electrical energy using high-performance batteries is one of the key technologies for energy supply in the 21st century. High performance and energy density, good cycle stability and durability make lithium-ion batteries strong candidates for use in hybrid and electric vehicles.

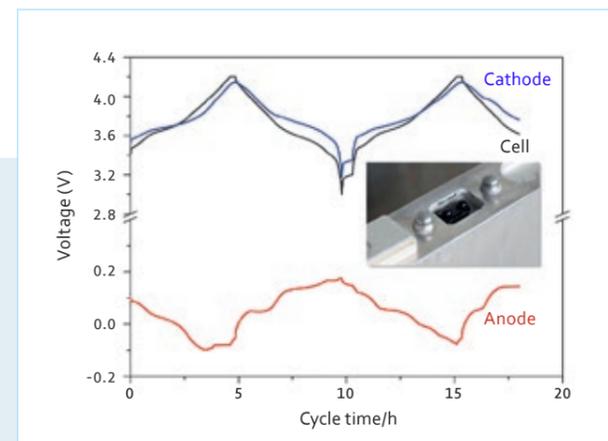
However, large-scale lithium-ion cells are extremely susceptible to faults as a result of even the smallest of errors during the production process. Although the exact process parameters are documented during production, a number of faults can only be detected when the battery is actually being used. Monitoring the internal life of the battery during formation and use is currently not possible – or only to a limited extent – but would be a great advantage. In the Smart-LIB project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Economics, lithium-ion cells in the PHEV1 format were equipped with internal sensors (T, V) for the first time and then subjected to a stress test. The collected sensor data was wirelessly transferred to an external receiver via an infrared transmitter, thus monitoring the state-of-health of the cell (SOH) in real time. This opens up new possibilities to detect critical battery conditions at an early stage and avoid failure in the field.



*„Mit der modular aufgebauten FPL unterstützen wir unsere Partner aus Industrie und Wissenschaft bei der Entwicklung und seriennahen Produktion von zuverlässigen, langlebigen und kostengünstigen Zellen.“*

// Dr. Wolfgang Braunwarth, Head of Department  
E-mail: wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de, phone: +49 (0)731 95 30-562

*“The modular construction of the FPL allows us to support the development and near-series production of reliable, durable, and cost-effective cells together with our partners from industry and science.”*



// Überwachung des Anoden- und Kathodenpotenzials einer 22-Ah-PHEV-1-Zelle, ausgestattet mit IR-Transmitter und innenliegender Sensorik.  
// Monitoring the anode and cathode potential of a 22-Ah PHEV1 cell fitted with an IR transmitter and an internal sensor system.

// Stefan Rößler  
E-mail: stefan.roessler@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-349

## // 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 ihre Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung oder in Unfallsituationen sowie die Entwicklung von Methoden des Batteriemagements im Mittelpunkt unserer Arbeiten. Die Einsatzbereiche der Batterien umfassen die stationäre Energiespeicherung in elektrischen Netzen und in portablen Geräten genauso wie in elektrifizierten Antriebssträngen für die Elektromobilität.

Im elektrischen Batterietest werden Zellen, Module und Systeme auf Funktionalität geprüft, ihre Leistungsfähigkeit vermessen und die zu erwartende Lebensdauer unter definierten Belastungen und Umgebungsbedingungen bestimmt. Mittels zerstörerischer Tests können die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilt werden.

Herzstück der Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Modellierung sowie die Simulation von Zellen und Batteriesystemen. Neben der Entwicklung von Modulen und Batteriemagementsystemen (BMS) werden modellbasierte Algorithmen zur Zustandsbestimmung (Ladezustand und Alterung), zur Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit, zur optimalen Laderegulierung und zum Energiemanagement erforscht. Ziel ist ein dynamischer, zuverlässiger und wirtschaftlicher Betrieb des Speichers in den genannten Anwendungen.

### // Our main focus

The ECA department investigates and develops electrochemical energy storage systems. To ensure that accumulators are safe and efficient even under the most extreme conditions, our work focuses on characterising them under various operating conditions and investigating their behaviour with regard to operating failures and accident situations, as well as developing battery management methods. The batteries' applications include stationary energy storage in electric grids and portable devices as well as in electrified drive trains for electromobility.

The electric battery test serves to investigate the functionality of cells, modules and systems, measure their performance and determine their expected service life under defined loads and environmental conditions. With abuse tests, the reactions and potential risks of heavily damaged accumulators and their resistance to various abuse conditions and operating failures can be assessed.

The main focus of battery system technology is thermal and electrical modelling and the simulation of cells and battery systems. In addition to developing modules and battery management systems (BMS), research activities on model-based algorithms to determine the state of the battery (state of charge and ageing), predict system performance and ensure optimal charge control and energy management are performed. The goal is a dynamic, reliable and efficient operation of the storage system in the applications mentioned.



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

// Dr. Harry Döring, Head of Department  
E-mail: [harry.doering@zsw-bw.de](mailto:harry.doering@zsw-bw.de), Phone: +49 (0)731 95 30-506

*“In the eLaB, we research, test, and analyse batteries and systems in flexible, standards-compliant and innovative ways.”*



### // Sicherheitsaspekte von Lithium-Ionen-Batterien

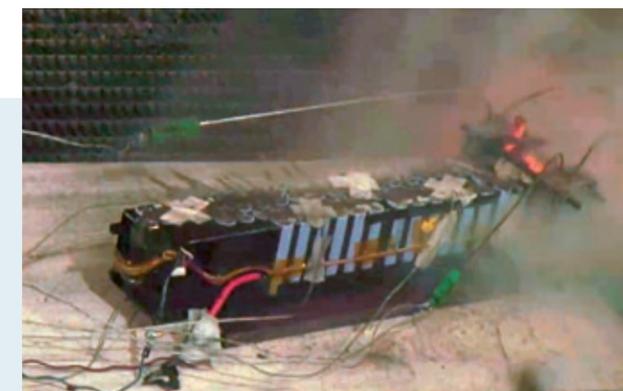
Mit der Verbreitung von Solar-Home-Speichersystemen mit Lithium-Ionen-Batterien sind Untersuchungen zur Sicherheit der Speicher, der Installationsumgebung, zur Zuverlässigkeit und Störsicherheit des Batterie- und Energiemanagementsystems sowie zur Eigensicherheit der verbauten Batteriezellen wichtig. Geraten Lithiumbatterien in Brand, sind sie nur schwer löschar und es können gesundheitsschädliche und auch toxische Gase entstehen. Im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekte „Sicherheit und Netzdienlichkeit von elektrischen Heimspeichersystemen mit Li-Ionen-Batterien“ und „Sicherheit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen mit Speichersystemen“ werden Alterungseigenschaften sowie Missbrauchsverhalten der Lithium-Ionen-Batterien untersucht.

Hierfür wurden Möglichkeiten zur Löschung eines Batteriebrandes unter Verwendung einer Modellbatterie 800 Wh LiC-LiNMC ausgeführt. Die Initialisierung des Brandes erfolgte durch gezielte Überhitzung an einer Stelle des Batteriemoduls, wodurch die überhitzten Zellen durch den „Thermal Runaway“ (s. Abb. unten) in Brand gerieten. Mit der großen Hitzeentwicklung erfolgte ein Fehlerübertrag auch auf die benachbarten Zellen. Ziel des Löschvorgangs war, die Brandausbreitung in die Umgebung zu verhindern und nach Möglichkeit die Fehlerpropagation innerhalb der Batterie zu unterdrücken. Im Projekt wurden vor allem wasserbasierte Löschmittel (Hochdruckzerstäubung, Sprühstrahl, tensidischer Löschwasserzusatz, wasserbasierte Löschmitteldispersionen, Schwer- und Leichtschäum) sowie CO<sub>2</sub> und Pulverlöschmittel untersucht. Bewährt hat sich vor allem die Hochdruckzerstäubung mit Wasser ebenso wie der Sprühstrahleinsatz, bei denen sowohl Propagation als auch Wiederzündung verhindert werden konnte.

### // Safety aspects of lithium-ion batteries

As solar power home storage systems with lithium-ion batteries become more widespread, investigations into the safety of the batteries, the installation environment and its effect on the reliability and interference resistance of the battery and energy management system, as well as into the intrinsic safety of the installed battery cells, are becoming more important too. The fire of a burning lithium battery is hard to extinguish, and it produces harmful and toxic vapours. The ageing characteristics of lithium-ion batteries and their behaviour under abuse in domestic storage systems are being examined as part of the joint projects “Safety and grid-subservience of domestic electric storage systems with lithium-ion batteries” and “Safety and reliability of PV systems with storage systems”, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy.

For this purpose, approaches to extinguishing a battery fire were tested using an 800 Wh LiC-LiNMC model battery. The fire was started by way of selective overheating at one site in the battery module, which caused the overheated cells to catch fire due to thermal runaway (see fig. below). A fault transfer onto neighbouring cells occurred along with the development of intense heat. The aim of the extinguishing process was to prevent the spread of fire to the surrounding environment and, where possible, to suppress fault propagation within the battery. For the most part, the project looked into water-based extinguishing agents (high-pressure atomisation, spray jet, surfactant additive for fire-fighting water, water-based extinguishing agent dispersions and heavy and light foam) as well as CO<sub>2</sub> and extinguishing powders. High-pressure atomisation with water and spray jet application, which could be used to prevent both propagation and reignition, proved particularly successful.



// Batteriemodul nach künstlich erzeugtem „Thermal Runaway“. Löszeit 2 Sekunden.  
// Battery module after artificially simulated thermal runaway. Extinguishing time: 2 seconds.

// Dr. Harry Döring  
E-mail: [harry.doering@zsw-bw.de](mailto:harry.doering@zsw-bw.de)  
Phone: +49 (0)731 95 30-506



// Testbunker mit Videoüberwachung und 100-Tonnen-Pressen.  
// Test bunker with video monitoring and 100-tonne press.



// Laboruntersuchungen an einem Heimspeicher.  
// Laboratory tests on a home storage system.

## // Energetische Untersuchung von Zellen bei Abuse

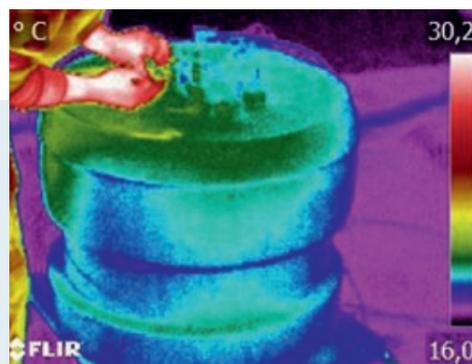
Neben der Performance von Batterien werden im Rahmen verschiedener Projekte Sicherheitsrisiken von Batteriespeichern untersucht. Dazu wurde am ZSW in den vergangenen Jahren eine umfangreiche Infrastruktur aufgebaut, die verschiedene zerstörerische Testarten (Abuse-Tests) ermöglicht. Tests im Autoklav ermöglichten die Messung von Strömen, Temperaturen und Spannungen. Zusätzlich wurde über den Druck die emittierte Gasmenge ermittelt und über eine Probenentnahme die Gaszusammensetzung bestimmt.

Während der zerstörerischen Prüfung wurde ermittelt, welche Energie unkontrolliert von der Zelle abgegeben wurde, und damit das Gefahrenpotenzial des Speichers. Aus diesem Grund wurde ein vorhandener Autoklav aufgerüstet und mit der „Pseudo-Kalorimeterfunktion“ ausgestattet. Dazu wurde der Autoklav thermisch isoliert (s. Abb. unten) und mit einer Vielzahl von Temperatursensoren ausgestattet, und es wurden umfangreiche Kalibrierungen ausgeführt. Bisher konnten thermische Emissionsmessungen nur für relative kleine Zellen im „Accelerated Rate Calorimeter“ (ARC) ausgeführt werden. Solche Messungen können jetzt auch für große Zellen (bis zu 10–100 Ah) ausgeführt werden. Erste Messungen ergaben, dass die emittierte thermische Energie das Zweifache des äquivalenten elektrischen Speichervermögens beträgt.

## // Energetic examination of cells in abuse cases

In addition to battery performance, the risks of battery storage systems are being analysed in the framework of various projects. To this end, ZSW has built up an extensive infrastructure that allows for various types of destructive testing in recent years. Tests in the autoclave made it possible to measure currents, temperatures and voltages. In addition, the emitted vapour quantity was determined by its pressure, and the composition was determined by sampling.

As part of the destructive test, it was determined which uncontrolled release of energy was produced by the cell, thereby identifying the hazard potential of the storage system. For this reason, an available autoclave was upgraded and equipped with a “pseudo-calorimeter function”. It was thermally insulated (see images below) and fitted with a large number of temperature sensors, and then extensive calibration measurements were carried out. To date, thermal emission measurements were only possible for relatively small cells in “accelerated rate calorimeters” (ARC). Such measurements can now also be performed for large cells (up to 10–100 Ah). Initial measurements showed that the emitted thermal energy is twice the equivalent electrical storage capacity.



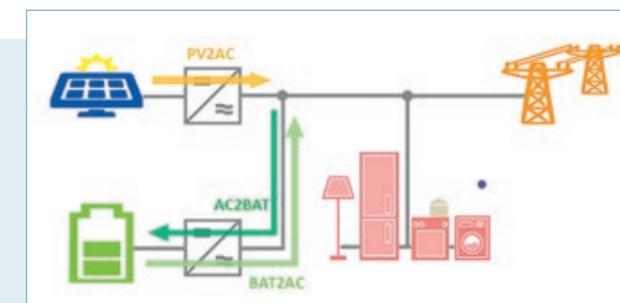
// Autoklav im isolierten Zustand zur thermischen Vermessung von Batterien.  
// Autoclave in an insulated state for thermal measurements of batteries.

// Harald Brazel  
E-mail: harald.brazel@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-503

## // PV-Heimspeichersysteme – Performance-Untersuchung

Batteriespeichersysteme werden zunehmend für Anwendungen im Wohnbereich installiert. Die Kombination von Photovoltaik(PV)-Anlagen mit Stromspeichersystemen ermöglicht es, einen höheren Anteil der erzeugten PV-Energie zu verwenden, um die lokale Nachfrage zu decken und dabei den Strombezug aus dem Stromnetz zu reduzieren. Die Eigenverbrauchs- und Autarkiegrade, die mit PV-Batteriesystemen erreicht werden können, sind wichtige Indikatoren bezüglich der Performance der Systeme.

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekte „SPEISI“ und „Safety First“ wird u. a. die Performance von verschiedenen PV-Speichersystemen und deren elektrochemischen Zellen analysiert. Dabei werden zu den Eigenverbrauchs- und Autarkiegraden die Leistungsbereitschaft und die Energieeffizienz untersucht. Für die Energieeffizienz eines Stromspeichers werden die Energieumwandlungsverluste in der Leistungselektronik und in Batterien, Stand-by-Verluste des Speichersystems und die nutzbare Batteriekapazität berücksichtigt. Außerdem hat die Qualität der Systemsteuerung einen signifikanten Einfluss auf die Performance des Speichersystems. Die Steuerung wird durch seine Reaktionszeit, die Flankensteilheit, die Regulierung von Leistungsschwankungen und das SOC-Betriebsfenster gekennzeichnet. Die Untersuchungen werden zum Teil im Labor mittels PV-Simulatoren und AC-Lasten und zum Teil in einem realen Haushalt mit einer PV-Anlage und verschiedenen Verbrauchern zur Erforschung der Systemalterung durchgeführt. Ergänzend zu den Untersuchungen an Heimspeichern werden Zelltests an deren Zellen durchgeführt. Die Tests auf Zellebene sollen einen Einblick in die Performance des Gesamtsystems geben. Dabei werden die Zellen auf ihre Zyklensfestigkeit, Leistungsbereitschaft und Lagerung bei verschiedenen Zellzuständen untersucht.



// Energiewandlungspfade eines AC-gekoppelten PV-Batteriespeichersystems.  
// Energy conversion paths of an AC coupled PV battery storage system.

## // PV home storage systems – performance analysis

Battery storage systems are increasingly being installed for residential applications. The combination of PV systems with current storage systems makes it possible to use a higher proportion of the generated PV energy to cover the local demand while reducing the electricity consumption from the electricity grid. The degrees of self-consumption and self-sufficiency, which can be achieved with PV battery systems, are important indicators regarding the performance of the energy storage systems.

Within the scope of the public funding projects SPEISI and Safety First, the performance of various PV storage systems and their electrochemical cells is being analysed. In addition to self-consumption and self-sufficiency, the power capability and energy efficiency are examined. The energy conversion losses in the power electronics and batteries, standby losses in the storage system and the usable battery capacity are taken into account for determining the energy efficiency of a current storage system. In addition, the quality of the system’s control has a significant influence on the performance of the energy storage system. The control is characterized by its response time, edge steepness, the regulation of power fluctuations and the SOC operating window. The investigations are carried out partly in the laboratory using PV simulators and AC loads and partly in a real household with a PV system and various consumers, in order to investigate the ageing of the system. Furthermore, the electrochemical cells of the home storage system are tested. The tests on cell level should give an insight into the performance of the overall system. The cells are examined for their cycle stability, power capability and storage behaviour at different cell states.

// Joaquín Klee Barillas  
E-mail: joaquin.klee-barillas@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-536

# // Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

## Fuel Cell Fundamentals (ECG)



### // Unsere Kernkompetenzen

Energie, Leistung und Sicherheit von Energiespeichern sind Kernfragen für eine nachhaltige Mobilität und eine auf fluktuierender Stromerzeugung basierende Energieversorgung. Aus diesem Grund stehen Hochleistungsspeicher mit wässrigen Elektrolyten, Metall-Luft-Akkumulatoren, Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC), neue Ansätze zur elektrolytischen Wasserstoffherzeugung sowie Redox-Flow-Systeme im Mittelpunkt unserer Arbeiten.

Die Entwicklungen am ZSW zu Komponenten für PEM-Brennstoffzellen erstrecken sich von der Elektrode bis zur Bipolarplatte. Das Fachgebiet ECG beschäftigt sich mit den Prozessen in der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) sowie mit der Elektroden- und Katalysatorentwicklung. Ein Thema hierbei sind neue, oxidationsstabile Katalysatorträgermaterialien. Diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten helfen beim Verständnis grundlegender Fragen zur Elektrodenstabilität.

Neue Wege zu Hochleistungsspeichern mit wässrig-alkalischen Elektrolyten eröffnen sich durch die Herstellung oberflächenreicher Nickelelektroden. Die aktuellen Entwicklungen erlauben Entladezeiten im Sekundenbereich ohne signifikanten Kapazitätsverlust.

In Zink-Luft-Zellen sind die Zyklenfestigkeit der Zink- und der bifunktionalen Sauerstoffelektrode im Fokus. Auch hier ist die Identifikation von im Elektrolyten beständigen und oxidationsstabilen, elektronisch leitenden Materialien von großer Bedeutung.

Unser Team verfügt über langjährige Erfahrung und die nötige Infrastruktur, um neue technologische Ansätze aufzugreifen und schnell im Labor zu verifizieren und demonstrieren.

### // Our main focus

Energy, performance and safety of energy storage systems are key issues for sustainable mobility and an energy supply based on fluctuating electricity generation. For this reason, we focus on high-performance storage systems with aqueous electrolytes, metal-air batteries, polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) and new approaches to electrolytic hydrogen production and redox flow systems.

At ZSW, PEM fuel cell component developments range from the electrode to the bipolar plate. The ECG department is working on processes within the membrane electrode assembly (MEA) as well as electrode and catalyst development. One of the topics is innovative, oxidation-resistant catalyst support materials. These research and development activities help in understanding fundamental issues of electrode stability.

New approaches to high-capacity storage systems with aqueous alkaline electrolytes become possible with the production of high surface area nickel electrodes. Current developments allow discharge times in the range of seconds without a significant loss of capacity.

The focus in zinc-air cells is on the cyclic stability of the zinc used and the bifunctional oxygen electrode. Identifying electrically conductive materials that are durable in the electrolyte and resistant to oxidation is of great importance.

Our team has many years of experience and has the necessary infrastructure to verify and demonstrate new technological approaches in the laboratory.

### // Brennstoffzellenstack für den Fahrzeugantrieb

Ziel des europäischen Verbundprojekts AutoStack-CORE ist die Entwicklung eines industriell fertigen PEM-Brennstoffzellenstacks mit höchster Leistungsdichte bei gleichzeitiger Einhaltung stringenter Kostenziele. Das ZSW koordiniert das Konsortium mit neun Partnern aus der Automobil- und Zulieferindustrie sowie fünf Forschungsinstituten.

Die Kernelemente der Stackentwicklung waren metallische Bipolarplatten aus extrem dünnem Edelstahlblech, die eine sehr kompakte und leichtgewichtige Bauweise ermöglichen, sowie Membran-Elektroden-Einheiten (MEAs) mit reduziertem Edelmetallgehalt, die wesentlich zur Kostensenkung beitragen.

Die enge Kooperation über die gesamte Wertschöpfungskette erlaubte es, innerhalb von drei Jahren in zwei Designschleifen ein Stack-Funktionsmuster mit der international wettbewerbsfähigen Peak-Leistungsdichte von 4 kW/l herzustellen. Erste Leistungstests konnten ein robustes Betriebsverhalten sowohl in Kurzstacks als auch in einem Vollstack belegen (s. Abb. unten). Weitere Tests zur Ermittlung des Betriebsverhaltens und der zu erwartenden Lebensdauer sind im Gang. Eine unabhängige Studie weist zudem eine attraktive Kostenstruktur aus.

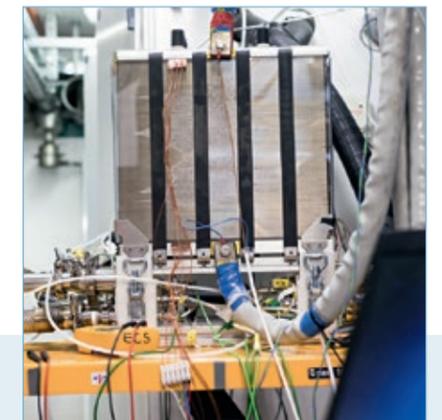
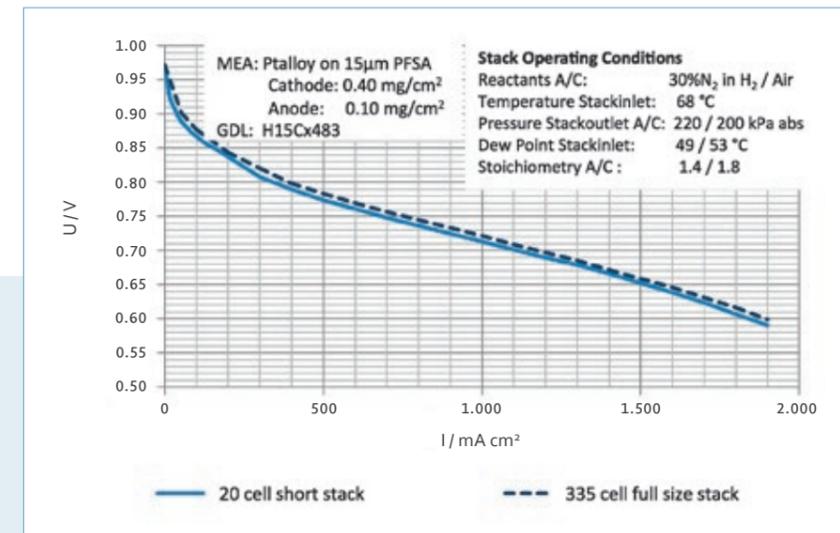
### // Fuel cell stacks for vehicle propulsion

The goal of the European joint project AutoStack-CORE is to develop an industrially feasible PEM fuel cell stack with the highest power density while meeting stringent cost goals. ZSW is coordinating a consortium of nine partners from the automotive and supplier industries as well as five research institutes.

The core elements of stack development were metallic bipolar plates made of extremely thin stainless steel that enabled a highly compact and lightweight construction, as well as membrane electrode assemblies (MEAs) with a reduced precious metal content, which contributed significantly to the cost reduction aspect.

The close cooperation along the entire value chain allowed us to produce a stack function model with an internationally competitive peak power density of 4 kW/l in just three years and two design stages. First performance tests demonstrated robust operating behaviour in short stacks and in full stacks (see fig. below). Further tests are being carried out to determine the operating behaviour and expected cell life. An independent study also revealed a favourable cost structure.

// Kennlinienvergleich AutoStack-CORE Kurz- und Vollstack.  
// Characteristic curve comparison of AutoStack-CORE, short and full stack.



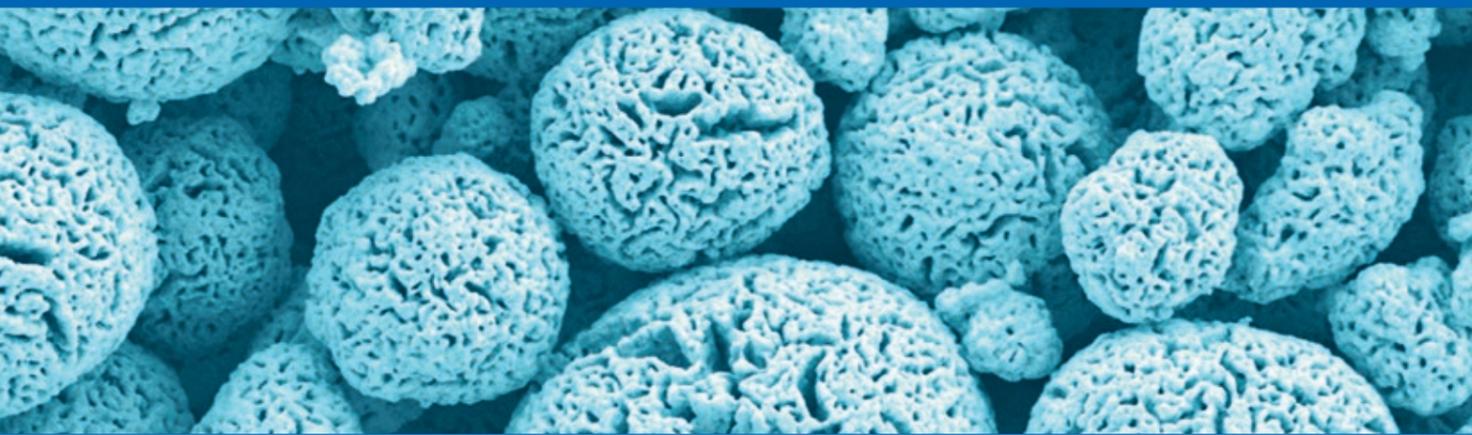
// Dr. Ludwig Jörissen  
 E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de  
 Phone: +49 (0)731 95 30-605



*„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 (0)731 95 30-605

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



// Elektronenmikroskopische Aufnahme der sphärischen Nickelpartikel.  
// An electron microscopic image of the spheroidised nickel particles.

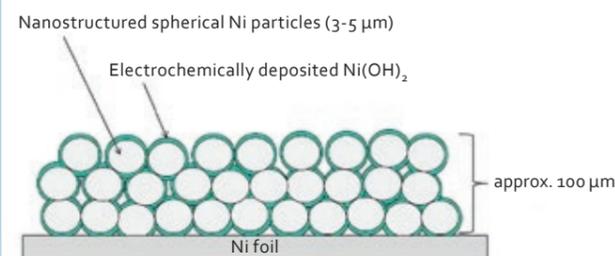


## // Ultra-Hochleistungsspeicher mit kurzen Lade- und Entladezeiten

In der industriellen Praxis werden für wässrig-alkalische Zellen im wesentlichen Nickelschaum- und Nickelsinter Elektroden eingesetzt. Jedoch beschränken deren limitierte Oberflächen die Leistungsfähigkeit der Elektroden. Prozesse, die an Grenzflächen stattfinden, wie der Durchtritt von Elektronen vom Aktivmaterial zum Ableiter, werden durch die Erhöhung der Oberfläche beschleunigt. Daher war es ein Ziel, oberflächenreiche Nickelelektroden aus nanoporösen Nickelpartikeln herzustellen.

Die Herstellprozedur der oberflächenreichen Nickelelektroden wurde bewusst einfach gestaltet. Es wurde ein Beschichtungsprozess (Coating) entwickelt, der nanostrukturierte sphärische Nickelpartikel auf Nickelfolien festhaftend beschichtet (s. Abb. oben). Die hergestellten oberflächenreichen Nickelschichten haben eine Schichtdicke von etwa 100 µm und eine Porosität von etwa 66 %. Die Oberfläche wird dadurch um den Faktor 78,5 im Vergleich zu planaren Ableitern gesteigert.

Die oberflächenreichen Nickelelektroden wurden anschließend mit Ni(OH)<sub>2</sub> als Aktivmaterial beschichtet und als positive Elektrode in asymmetrischen Doppelschichtkondensatoren mit alkalisch-wässrigen Elektrolyten eingesetzt (s. Abb. unten). Als negative Gegenelektrode fungierte eine Elektrode aus kommerziellem Aktivkohlenstoff. Die hergestellte Zelle zeigte die Wirksamkeit dieses Konzepts: Entladeraten bis zu 1.150 C ohne signifikanten Kapazitätsverlust erlauben vollständige Entladungen innerhalb von drei Sekunden. Strombelastungen von mehr als 1.000 A pro eingesetztes Gramm Nickelhydroxid können auf diese Weise realisiert werden.



// Schematische Darstellung des Aufbaus von beschichteten oberflächenreichen Nickelelektroden.  
// Schematic representation of the structure of the coated high-surface-area nickel electrodes.

// Dr. Olaf Böse  
E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-615

## // Ultra-high-performance storage systems with short charge and discharge times

In industrial practice, nickel foam and sintered nickel electrodes are usually used for aqueous alkaline cells. However, their limited surface areas also limit the performance of the electrodes. Processes that take place at the interfaces, such as the passage of electrons from the active material to the conductor, are accelerated by increasing the surface area. One goal was to produce high-surface-area nickel electrodes using nanoporous nickel particles.

The production process of the high-surface-area nickel electrodes was designed to be simple. A coating process was developed that creates a coating of nanostructured spherical nickel particles that adheres to nickel foils (see image above). The resulting large-surface-area nickel layers have a thickness of about 100 µm and a porosity of about 66%. The surface area is increased by a factor of 78.5 compared to planar conductors.

The high-surface-area nickel electrodes were subsequently coated with Ni(OH)<sub>2</sub> as an active material and then used as a positive electrode in asymmetric double-layer capacitors with alkaline aqueous electrolytes (see fig. below). The negative counter electrode was an electrode made of activated commercial carbon. The produced cell demonstrated the concept's efficiency: discharge rates of up to 1,150 C without a significant loss of capacity allow for a full discharge in three seconds. Current loads exceeding 1,000 A per gramme of employed nickel hydroxide could thus be achieved.

## // Materialentwicklung für wässrig-alkalische Hochleistungselektroden

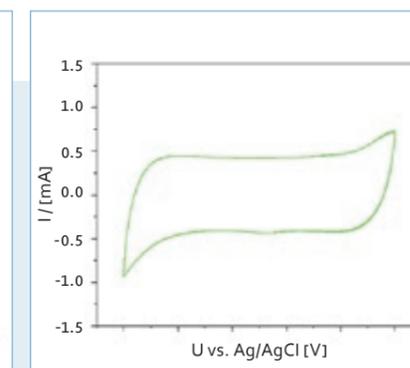
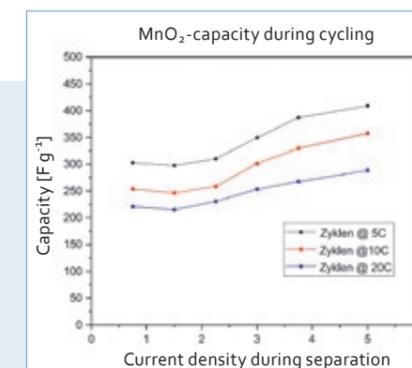
Asymmetrische Doppelschichtkondensatoren auf Basis wässrig-alkalischer Elektrolyte bieten neben der erhöhten Sicherheit aufgrund des nicht brennbaren Elektrolyten den Vorteil hoher Leistungsfähigkeiten durch die hohe Leitfähigkeit wässriger Elektrolyte. Sie zeigen deutlich höhere Energiedichten als die weit verbreiteten Superkondensatoren bei vergleichbarer Belastbarkeit. Als Materialien für die positive Elektrode werden industriell vorwiegend Nickelhydroxide eingesetzt. Als negative Elektrodenmaterialien werden häufig Aktivkohlenstoffe mit verschiedenen Aktivmaterialien genutzt.

Im Rahmen des vom Land Baden-Württemberg geförderten Projektes „FastStorage BW II“ werden sowohl positive als auch negative Aktivmaterialien auf Basis kostenoptimierter Materialien für asymmetrische Doppelschichtkondensatoren entwickelt. Für die positiven Materialien bieten sich MnO<sub>2</sub>-Modifikationen als alternative Werkstoffklasse an. Manganoxide wurden elektrochemisch unter verschiedenen Prozessbedingungen auf unterschiedlichen Trägermaterialien abgeschieden. Die Untersuchungen der abgeschiedenen Schichten zeigten sehr gute Zyklisierbarkeiten bei erhöhten Stromdichten (s. Abb. unten links). Die hergestellten Materialien zeigen ein ausgeprägtes kapazitives Verhalten ohne erkennbare Redoxaktivität (s. Abb. unten rechts). Auf der Seite der Materialien für die negativen Elektroden wurden Verbindungen auf der Basis von Zink und Eisen untersucht. Hier erwiesen sich überraschenderweise eisenbasierte Materialien als sehr interessante Werkstoffe, die im weiteren Projektverlauf detaillierter untersucht werden.

## // Materials development for aqueous alkaline high-performance electrodes

Asymmetric double-layer capacitors based on aqueous alkaline electrolytes offer increased safety due to the non-flammable electrolyte along with the advantage of high performance capabilities owed to the high conductivity of aqueous electrolytes. They exhibit significantly higher energy densities than the widespread supercapacitors but with a comparable loading capacity. Nickel hydroxides are a typical positive electrode material in industrial manufacturing. Common negative electrode materials include activated carbon with different active materials.

As part of the "FastStorage BW II" project, funded by the Federal State of Baden-Württemberg, active materials based on cost-optimised materials for asymmetric double-layer capacitors are being developed for both positive and negative electrodes. MnO<sub>2</sub> modifications are suitable for use as positive electrode materials, as an alternative class of materials. Manganese oxides were electro-chemically deposited on various carrier materials under different process conditions. Analyses of the deposited layers exhibited very good cycling capabilities with improved current densities (see fig. bottom left). The materials produced exhibit pronounced capacitive behaviour without any recognisable redox activity (see fig. bottom right). Compounds based on zinc and iron were investigated for the negative electrode material side. Surprisingly, iron-based materials have been found to be very interesting materials and will be investigated in more detail in the further course of the project.



// Stromabhängige, spezifische Kapazitäten von Mangandioxid für asymmetrische Doppelschichtkondensatoren (Abb. links).  
// Current-dependent, specific capacities of manganese dioxide for asymmetrical double-layer capacitors (fig. left).  
// Zyklovoltammogramm von Mangandioxid in 0,1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Elektrolyten zeigt ausgeprägtes Doppelschichtverhalten (Abb. rechts).  
// Cyclic voltammogram of manganese dioxide in a 0.1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte exhibits pronounced double-layer behaviour (fig. right).

// Dr. Olaf Böse  
E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-615

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



### // Unsere Kernkompetenzen

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

Der Leistungsbereich der Entwicklungen von PEMFC-Komponenten und -Stacks fängt bei wenigen Watt an und erstreckt sich bis zu 100 kW<sub>el</sub>. Die Brennstoffzellen werden auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit optimiert. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von Herstellertechniken und die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks sowie automobiltaugliche Brennstoffzellen.

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels modernster Simulationssoftware ein. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen mittels einer  $\mu$ -CT-Anlage validiert. Mit dieser Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden. Ergänzend verfügen wir über gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin entwickelte und durchgeführte Verfahren im Bereich der Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Visualisierung von Komponenten, Zellen und Stacks. Diese Technologien ermöglichen zeitliche und räumliche Auflösungen, die zu den weltweit besten gehören.

### // Our main focus

The ECB 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 and components as well as the construction of prototypes and the 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<sub>el</sub>. Fuel cells are optimised in terms of output, service life, efficiency and compactness. This also involves researching and estimating ageing processes and error analyses. The focus is on developing manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks and fuel cells suitable for vehicles.

ECB is able to model and simulate processes in fuel cells 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, water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using an  $\mu$ -CT system. This system also enables GDL structures, including their water content, to be investigated under compression. In order to visualise components, cells and stacks, we also use processes involving neutron and synchrotron radiography and tomography that we have jointly developed and conducted together with the Helmholtz Centre Berlin. These technologies enable temporal and spatial resolutions that are among the best in the world.

### // Betrieb von MT-DMFC-Stacks bei atmosphärischem Kathodendruck

Im Rahmen des von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen e.V. geförderten Projekts „Entwicklung von neuartigen MEA-Komponenten für MT-DMFC, betrieben bei atmosphärischem Kathodendruck“ wurde ein Mitteltemperatur-Direktmethanolbrennstoffzellen(MT-DMFC)-Stack für den Betrieb bei 130 °C entwickelt und an die besonderen Anforderungen bei atmosphärischem Kathodendruck angepasst.

Ein Ziel des Projekts ist es, das hohe Leistungsniveau von DMFC bei hohen Betriebstemperaturen mit den systemtechnischen Anforderungen eines niedrigen Kathodendrucks zur Erzielung eines hohen Systemwirkungsgrads zu verbinden. Neben der Elektrodenentwicklung wurden umfangreiche Zell- und Stackentwicklungsaktivitäten mit dem Ziel eines hochleistungsfähigen und an die besonderen Anforderungen bei den genannten Bedingungen angepassten Zeldesigns durchgeführt. In umfangreichen experimentellen und CFD-Simulationsaktivitäten wurde ein entsprechendes Kathodenflowfield entwickelt (s. Abb. unten). Dieses Flowfield zeigt eine wesentlich erhöhte Sauerstoffkonzentration in der Reaktionsschicht und weist dabei nur einen geringfügig erhöhten Differenzdruck auf. Das Verteilerfeld wurde in eine prägbare Version überführt und die Leistungsfähigkeit an einem vierzelligen Stack validiert.

In Kombination mit einer von Projektpartnern entwickelten nicht-fluorierten Membran zeigt der Stack bei Betrieb mit Methanol unter atmosphärischem Kathodendruck eine maximale Leistungsdichte von mehr als 0,15 W/cm<sup>2</sup>.

### // Operation of MT-DMFC stacks at atmospheric cathode pressure

As part of the “Development of innovative MEA components for MT-DMFC operated at atmospheric cathode pressure” project funded by “The German Federation of Industrial Research Associations” a medium temperature direct methanol fuel cell (MT-DMFC) stack was developed for operation at 130 °C and adapted to the special requirements at atmospheric cathode pressure.

One goal of the project is to combine the high performance of DMFC at high operating temperatures with the system engineering requirements of low cathode pressure, to achieve high overall system efficiency. In addition to the development of electrodes, extensive cell and stack development activities were carried out with the aim of designing a high-performance cell adapted to the particular conditions mentioned above. A corresponding cathode flow field was developed (see fig. below) following extensive experimental and CFD simulation activities. This flow field exhibits significantly elevated oxygen concentration in the reaction layer and only slightly increased differential pressure. The distribution field was converted into an embossable version, and its performance was validated using a four-cell stack.

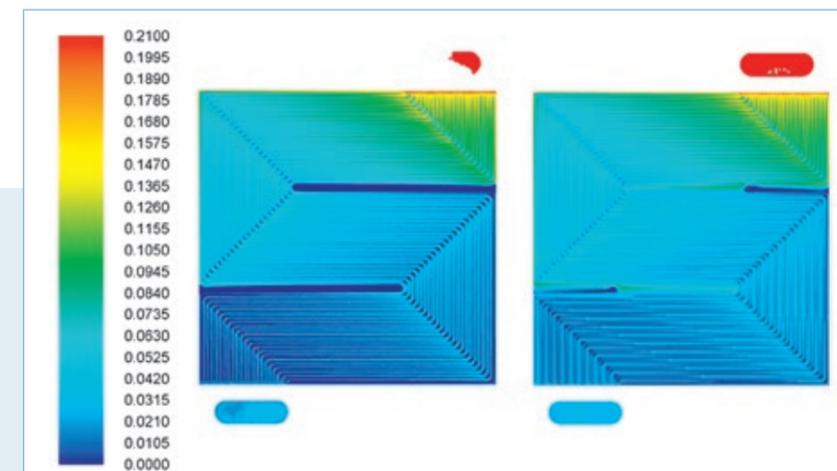
In combination with a non-fluorinated membrane developed by the project partners, the stack exhibits a maximum power density of more than 0.15 W/cm<sup>2</sup> when operated with methanol at atmospheric cathode pressure.



*„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 (0)731 95 30-206

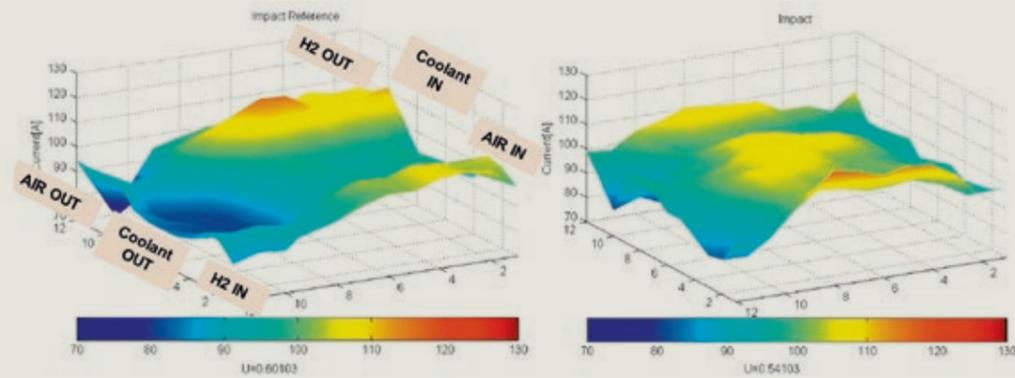
*“Our work focuses on optimising fuel cells with all their components in terms of design, manufacturing, output and service life.”*



// Molare Sauerstoffkonzentration in der MPL bei 600 mA/cm<sup>2</sup>. Zufluss rechts oben, Abfluss links unten. Basisflowfield (links), optimiertes Flowfield (rechts).

// Molar oxygen concentration in the MPL at 600 mA/cm<sup>2</sup>. Inflow upper right, drain lower left. Standard flow field (left), optimised flow field (right).

// Dr. Joachim Scholta  
E-mail: joachim.scholta@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-206



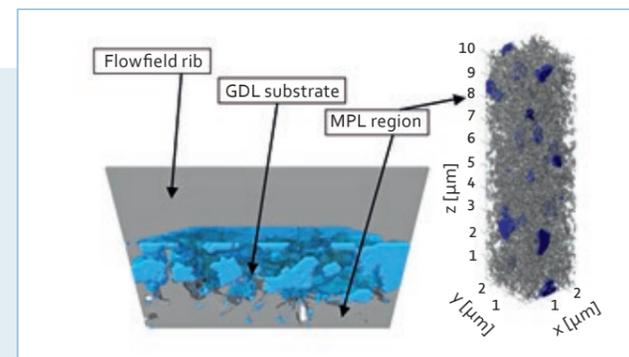
// Stromdichteverteilung der Zelle für eine kommerzielle Referenz-MEA (links) im Vergleich zu einer IMPACT-MEA mit reduzierter Platinbeladung (rechts).  
 // Current density distribution of the cell comparing a commercial reference MEA (left) to an IMPACT MEA featuring low platinum loading (right).



## // Abschluss des EU-Verbundprojekts IMPACT

Das Hauptziel des vierjährigen EU-Projekts IMPACT (FCH-JU-Förderung) bestand darin, die Haltbarkeit von Brennstoffzellen-stacks mit Membran-Elektroden-Einheiten mit sehr geringer Platinbeladung ( $< 0,2 \text{ mg/cm}^2$ ) für automobiler Anwendungen zu erhöhen. Ein besonderer Fokus lag auf der Verbesserung der Stabilität der Katalysatoren. Weiterhin wurden sehr dünne AQUIVION®-PFSA-Membranen (ca.  $10 \mu\text{m}$  dick) entwickelt und chemisch stabilisiert, die hohen Korrosionsschutz gewährleisten und den Übertritt von Wasserstoff reduzieren. Ferner zeigten hochgraftisierte Kohlenstoff-Trägermaterialien in beschleunigten Alterungstests eine signifikante Verbesserung der Haltbarkeit der Katalysatorschichten. Der Projektansatz bestand in einer iterativen Materialentwicklung in Kombination mit umfassenden Tests an Einzelzellen und Stacks (7 Generationen). Eingehende Ex-situ und In-situ-Untersuchungen lieferten ein besseres Verständnis der Alterungsmechanismen. Die Platinbeladung konnte von  $0,6 \text{ mg/cm}^2$  auf  $0,2 \text{ mg/cm}^2$  reduziert und eine Leistungsdichte von bis zu  $1,0 \text{ W/cm}^2$  bei  $1,8 \text{ A/cm}^2$  erreicht werden. Darüber hinaus wurde ein Kostenmodell und eine Lebenszyklus-Kostenanalyse entwickelt.

Aufgaben des ZSW waren umfangreiche Tests sowohl auf Einzelzell- als auch auf Stackebene, so z. B. zur Überprüfung der Haltbarkeit von Brennstoffzellenstacks bis zu einer Betriebsdauer von 2.500 Stunden, Untersuchungen zur Auswirkung von Luftschadstoffen auf die Leistung und Lebensdauer der Brennstoffzellen sowie Ex-situ-Charakterisierungen von neuen und gealterten Materialien. Zur Simulation des Verhaltens von Wasser im Innern poröser Materialien wurde das ZSW-eigene Monte-Carlo-Modell wesentlich erweitert, um so die Katalysatorschicht und die angrenzende mikroporöse Schicht (MPL) auf der Porenebene zu beschreiben. Außerdem wurden umfangreiche CFD-Vollzellsimulationen zu Strömungseffekten im Gasverteilerfeld und zur Unterstützung der Katalysatorentwicklung durchgeführt.



## // Completion of the collaborative EU project IMPACT

The main objective of the four year European project IMPACT (funded by the FCH JU under grant agreement) was to increase the durability of fuel cells with membrane-electrode assemblies containing ultra low platinum loading ( $< 0.2 \text{ mg/cm}^2$ ) for automotive applications. Within the project, substantial effort was made to increase the stability of the catalysts. Very thin ( $10 \mu\text{m}$  thickness) AQUIVION® PFSA membranes were developed, including chemical stabilisation, assuring high resistance against corrosion and reduced hydrogen crossover. The introduction of highly graphitised carbon supports leads to significant improvement of CCM durability in accelerated stress tests. The project approach was iterative material development combined with extensive single cell and stack testing (7 generations). Using detailed ex-situ and in-situ analysis techniques, a better understanding of degradation mechanisms could be obtained. Within the project, the Pt loading was reduced from  $0.6 \text{ mg/cm}^2$  to  $0.2 \text{ mg/cm}^2$ , and a power density up of  $1.0 \text{ W/cm}^2$  at  $1.8 \text{ A/cm}^2$  could be achieved. A dedicated cost model and life cycle analysis were developed.

ZSW's part in the project consisted of extensive testing activities both on stack and single cell level, e. g. durability testing of stacks at up to 2,500 hours operating time and extensive studies on the influence of air contaminants on performance and durability. ZSW contributed ex-situ characterisation of new and aged materials as well as extensive modelling work. The in-house Monte-Carlo model to simulate the behaviour of liquid water within porous material was extended to allow simulations on the scale of the pores within the catalyst layers and the adjacent MPL. Additionally, comprehensive CFD full-cell simulations were performed to investigate flowfield effects and support the catalyst development.

// Monte-Carlo-Modellierung auf unterschiedlichen Längenskalen: Resultierende Wasserverteilung in GDL-Substrat-Poren auf der einige  $10\text{-}\mu\text{m}$ -Skala unter einem Steg ( $99,5\%$  rel. Feuchte, links) und in den Poren der MPL auf der einige  $10\text{-nm}$ -Skala ( $80\%$  rel. Feuchte, rechts).  
 // Monte-Carlo modelling on different length scales: resulting water distribution in several ten  $\mu\text{m}$ -scale pores in the GDL substrate below the rib ( $99,5\%$  rel. hum., left) and in several ten nm-scale pores in the MPL ( $80\%$  rel. hum., right).

// Dr. Florian Wilhelm  
 E-mail: [florian.wilhelm@zsw-bw.de](mailto:florian.wilhelm@zsw-bw.de)  
 Phone: +49 (0)731 95 30-203

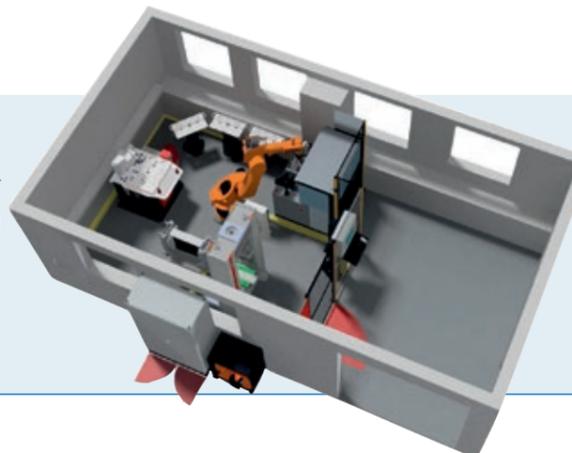
## // Aufbau einer automatisierten Brennstoffzellenfertigung

Gegenwärtig wird im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekts „BZ-Testfelderweiterung“ ein Technikum zur Erprobung automatisierter Montagetechniken für Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellenstacks (PEMFC) und Einzelzellen aufgebaut. Im Fokus der für das Technikum beschafften Anlagen stehen das mediendichte Fügen von Einzelzellen aus großformatigen grafitischen Bipolarplatten sowie das Stapeln von Brennstoffzellenstacks. Die Fertigungszelle ist in einem klimatisierten Raum (s. Abb. unten) untergebracht.

Basis der Anlage ist eine Mehrachsroboterstation, mit deren Hilfe Operationen wie das Greifen und Positionieren biegesteifer und biegeschlaffer Bauteile, die Übergabe der Bauteile zwischen Bearbeitungsstationen sowie das Stapeln von Zellen erprobt werden können. Die Automatisierung beinhaltet eine Station zur Aufbringung der Dichtungen durch Dispensroboter sowie eine Station zur Dichtigkeitsprüfung der gefertigten Bauteile. Darüber hinaus stehen eine Montagepresse, ein Härteofen sowie eine Station zur optischen 3-D-Vermessung von Kanalgeometrien der Bipolarplatten zur Verfügung.

Die lagegerechte Positionierung der einzelnen Komponenten wird mittels eines optischen Bildverarbeitungssystems sichergestellt. Zudem wird das Auftragen der Dichtungen in einer Inline-Prozessüberwachung über ein Laserscanningsystem überwacht. Die existierenden Anlagen im Technikum erlauben die Untersuchung verschiedener Arbeitsschritte wie die Eignung von Greifern, die Ermittlung zulässiger Beschleunigungen und Verfahrensgeschwindigkeiten, Operationen zur Ausrichtung von Bauteilen, Genauigkeit der Bauteilablage etc. Diese Informationen sind für die Auslegung und Optimierung von industriellen Montageanlagen von großer Bedeutung.

// Aufsicht auf die klimatisierte Fertigungszelle mit zentralem Mehrachsroboter zur Brennstoffzellenfertigung.  
 // Top view of the air-conditioned production unit with a central multi-axis robot for fuel cell production.



## // Construction of an automated fuel cell production facility

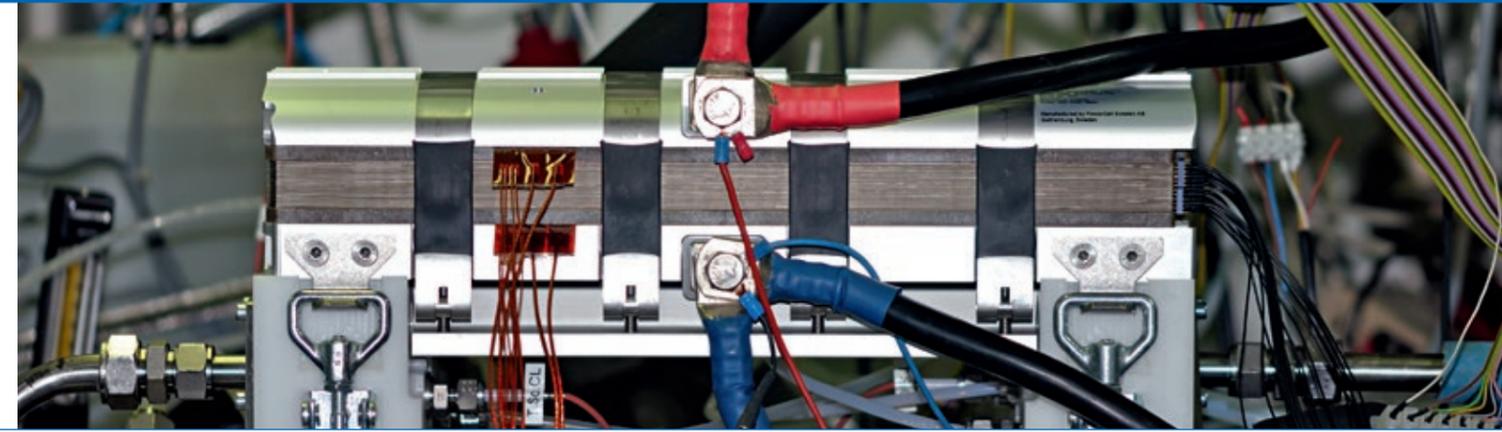
At present, a technical centre for testing automated assembly techniques for polymer electrolyte membrane (PEMFC) fuel cell stacks and individual cells is being built within the framework of the "Fuel cell test field extension" project (BZ-Testfelderweiterung), which is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. The focus of the facilities procured for the technical centre is on the media-impermeable joining of individual cells from large-format graphitic bipolar plates, as well as stacking fuel cell stacks. The production unit is installed in an air-conditioned room (see fig. below).

The centrepiece of the plant is a multi-axis robot station which is used to experiment with gripping and positioning brittle and pliable components and transferring the components between processing stations and stacking cells. Automation also includes a station for the application of seals by means of robotic dispensers as well as a station to test the tightness of manufactured components. An assembly press, an annealing oven and a station for the optical 3D-measurement of the channel geometries of the bipolar plates are also available.

The correct positional arrangement of the individual components is ensured by means of an optical image processing system. In addition, the application of the seals is monitored by inline process monitoring using a laser scanning system. The existing equipment in the technical centre allows for the investigation of various working steps such as the suitability of grippers, the determination of permissible accelerations and movement speeds, the actuations for the alignment of components and the accuracy of component deposition, etc. This information is of great importance when designing and optimising industrial assembly systems.

// Frank Häußler  
 E-mail: [frank.haeussler@zsw-bw.de](mailto:frank.haeussler@zsw-bw.de)  
 Phone: +49 (0)731 95 30-790

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



### // Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECS betreibt ein Testzentrum mit 25 vollautomatisierten Testständen von 0,1 bis 120 kW zur kosteneffizienten Rund-um-die-Uhr-Charakterisierung von Brennstoffzellenstacks, -systemen und -systemkomponenten. Eine umfangreiche Analytik ermöglicht die detaillierte Bewertung von Alterungsvorgängen und ausführlichen Fehleranalysen. Seit Sommer 2012 können Brennstoffzellen bis 100 kW<sub>e</sub>, auch nach der DIN EN 62282-2 geprüft werden. Industriepartner nutzen streng vertraulich durchgeführte Tests und das langjährige Know-how der Experten, um ihre Produkte besser zu verstehen und weiterzuentwickeln sowie deren Sicherheit nachzuweisen. In öffentlich geförderten Projekten werden wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

Langjährige Erfahrung bildet die Basis zur Entwicklung von Systemen für die unterschiedlichsten Anwendungen: von wenigen Watt bis 100 kW, von stationären Anlagen über Bordstrom- und Notstromversorgungen bis hin zu Fahrzeugsystemen. Unser Leistungsspektrum umfasst komplette Prototypen einschließlich der Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Wir unterstützen Industriepartner bei der Entwicklung und Erprobung von Systemkomponenten, bei Sicherheitsbewertungen, bei Packaging-Studien und bei der Produktzertifizierung.

Flüssige Brennstoffe wie Methanol sind aufgrund ihres hohen Energieinhaltes, der umweltschonenden Herstellung über Power-to-Liquid (P2L) und ihrer einfachen Speicherung von großem Interesse. Wir entwickeln hochkompakte Komponenten für die Reformierung dieser Brennstoffe sowie für die Aufbereitung der Edukte und wir bauen komplette Reformersysteme.

### // Our main focus

In order to characterise fuel cell stacks, systems and system components cost-efficiently in 24/7 operation, the ECS department runs a test centre with 25 fully automated test benches with 0.1 to 120 kW. Different analysis systems permit detailed assessments of ageing processes and failure reports. Since the summer of 2012, fuel cells of up to 100 kW<sub>e</sub> were tested in accordance with DIN EN 62282-2. The industry partners employ strictly confidential tests and leverage the long-standing know-how of our experts to better understand their products, develop them and demonstrate their safety. Valuable data and experience are gathered in publicly funded projects, which are also available to the public.

Many years of experience form the basis for the development of various systems, ranging from a few watts to 100 kW, and from stationary systems and on-board and emergency power supplies to automotive systems. Our scope of services comprises complete prototypes, including their control and hybridisation with batteries and DC/AC converters. We support industry partners by developing and testing system components and carrying out safety assessments as well as packaging studies and product certification.

There is considerable interest in liquid fuels like methanol because of their high energy content, their environmental friendly manufacturing via Power-to-Liquid (P2L) and easy storage. We develop highly compact components for reforming these fuels and preparing the reactants and we also build complete reforming systems.

### // Begleitforschung zu Wasserstoff- und Betankungsqualität

Mitentscheidend für die erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen ist derzeit der Aufbau von Wasserstoffstationen (H<sub>2</sub>-Tankstellen). Um dies voranzutreiben, wurde 2016 eine davon am ZSW in Ulm in Betrieb genommen.

H<sub>2</sub>-Tankstellen werden vor der Erstinbetriebnahme abgenommen und danach regelmäßig überprüft. Das ZSW verfügt über ein 2016 entwickeltes und zugelassenes Abnahmegerät nach Richtlinie SAE J2601. Das Gerät kann betankte H<sub>2</sub>-Mengen erfassen, um die Entwicklung einer eichfähigen Mengenummessung zu unterstützen, und erlaubt die Entnahme von H<sub>2</sub>-Proben für die Laboranalyse.

H<sub>2</sub> kann für Brennstoffzellen schädliche Verunreinigungen enthalten. Zulässige Grenzwerte sind in der SAE J2719/ISO 14687-2 definiert, können bislang aber noch von keinem unabhängigen Labor nachgewiesen werden. Am ZSW wurde deshalb 2016 ein neues Labor aufgebaut, mit dem ein Teil dieser niedrigen Grenzwerte nachweisbar ist. Das Labor wird erweitert, bis die SAE J2719/ISO 14687-2 vollständig nachgewiesen werden kann. Mit dem aktuell erreichten Stand (s. Abb. unten) wurden mehrere Probenahme- und Analyseaufträge erfolgreich bearbeitet.

Eine auf Schadanteile im H<sub>2</sub> hochsensitive Brennstoffzellen-MEA wurde identifiziert. Der Einfluss der Betriebsparameter auf die Sensitivität gegen den Hauptschadstoff CO konnte quantifiziert und ein für den Sensorbetrieb optimaler Bereich definiert werden. In Folgeprojekten sollen die Zelle miniaturisiert, die Reaktion auf andere Schadstoffe getestet und Komponenten für ein als Qualitätsmonitor einsetzbares Brennstoffzellensystem evaluiert werden.

### // Accompanying research on hydrogen and fuelling quality

The construction of hydrogen fuelling stations is key for a successful market launch of fuel cell vehicles. In 2016, one of them was put into operation at ZSW in Ulm.

Prior to initial commissioning, hydrogen fuelling stations need to be approved and then undergo periodic follow-up inspections. In 2016, ZSW developed an authorised approval unit that complies with SAE J2601. The device can record filled hydrogen quantities to support the development of a calibrated quantity measurement system and take hydrogen samples for laboratory analyses.

Hydrogen may contain impurities which are detrimental to fuel cells. Permissible values are defined in ISO 14687-2, but no independent laboratory has yet been able to detect them. So in 2016, a laboratory was set up at ZSW that can now detect some of these low limit values. The laboratory is being extended until the specifications in ISO 14687-2 can be fully tested. With the current status (see fig. below), several sampling and analysis orders have been successfully completed.

A fuel cell MEA highly sensitive to harmful substances in hydrogen was identified. The impact of operating parameters on the sensitivity to the main contaminant CO was quantified, and an optimum range for sensor operation was defined. In follow-up projects, the cell will be miniaturised, and the reaction to other contaminants will be tested. Components for a fuel cell system that can be used as a quality monitor will also be evaluated.



*„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(0)731 95 30-832

*“In the long run, global climate goals will not be achievable without hydrogen technology. Now we have to learn how to integrate hydrogen into our daily life.”*



// Neue Laborausstattung zur Analyse von Wasserstoffproben nach SAE J2719/ISO 14687-2.  
// New laboratory equipment for the analysis of hydrogen samples in accordance with SAE J2719/ISO 14687-2.

// Markus Jenne  
E-mail: markus.jenne@zsw-bw.de  
Phone: +49 (0)731 95 30-821



// Öffentlichkeitsarbeit // Public Relations



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. Der folgende Rückblick vermittelt einen Eindruck von unseren Veranstaltungen und unserer Medienarbeit des Jahres 2016.

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. The following review provides you with an insight into our events and public relations work in 2016.

**// ZSW feiert Richtfest in Stuttgart-Vaihingen**

Am 28. Januar 2016 feierte das ZSW Richtfest für sein neues Institutsgebäude in der Meitnerstraße 1 in Stuttgart. Auf 8.000 m<sup>2</sup> Quadratmetern Nutzfläche bietet das Gebäude Platz für größere Forschungslabore, Werkstätten und Büros. Eine Solarstromfassade mit CIGS-Dünnschichtmodulen aus eigener Entwicklung repräsentiert ein wichtiges Thema des Instituts nach außen. Regenerativ erzeugte Wärme ist ebenfalls Bestandteil des Energiekonzepts. Im März 2017 sind die Mitarbeiter eingezogen.

**// ZSW celebrates topping-out ceremony in Stuttgart-Vaihingen**

On 28 January 2016, ZSW celebrated the topping-out ceremony for its new institute building in Meitnerstrasse 1 in Stuttgart. With 8,000 square metres of floor space, the building provides ample room for larger research labs, workshops and offices. A solar photovoltaic façade with CIGS thin-film modules – a technology developed by ZSW – is an outward sign of a topic close at heart to the institute. Regeneratively generated heat is also part of the energy concept. The employees moved into the new space in March 2017.



// Ansprache von ZSW-Vorstand Prof. Dr. Frithjof Staiß beim Richtfest.  
// Prof. Dr Frithjof Staiß, ZSW's Executive Chairman, spoke at the topping-out ceremony.



// Ansicht des ZSW-Neubaus mit Solarfassade im Januar 2017.  
// View of the new building with solar façade in January 2017.

**// Öffentlichkeitsarbeit  
Public Relations**



// Im Marmorsaal des Neuen Schlosses in Stuttgart wurden Vertreter aus 27 Stadt- und Landkreisen zur Verleihung des „Leitsterns Energieeffizienz“ empfangen.  
// Delegates from 27 urban and rural districts were welcomed in the Marble Hall of Neues Schloss in Stuttgart to receive the “Guiding Star in Energy Efficiency” award.

**// Verleihung „Leitstern Energieeffizienz“ Baden-Württemberg**

Zum dritten Mal hat das baden-württembergische Umweltministerium den „Leitstern Energieeffizienz“ verliehen. Der erste Platz ging an den Landkreis Ravensburg. Rang 2 belegte Vorjahressieger Landkreis Böblingen, Dritter wurde der Landkreis Göppingen. Sonderpreise erhielten die Städte Stuttgart und Karlsruhe sowie die Kreise Schwäbisch Hall, Tuttlingen und Lörrach. Das ZSW hat den Kriterienkatalog zur Bewertung der Maßnahmen und Aktivitäten in den Kreisen entwickelt. Deren Vertreter nahmen am 15. November die Auszeichnungen von Ministerialdirektor Helfmried Meinel im Marmorsaal des Neuen Schlosses in Stuttgart entgegen. Insgesamt 27 der 44 Stadt- und Landkreise Baden-Württembergs hatten teilgenommen. Der „Leitstern“ berücksichtigte 2016 erstmals die Anstrengungen der Kreise in allen drei Energiesektoren: Strom, Wärme und Verkehr.

**// Presentation of the “Leitstern Energieeffizienz” award in Baden-Württemberg**

For the third time, the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg presented the “Leitstern Energieeffizienz” award. The first place went to the district of Ravensburg. The second place went to the previous year’s winner, the district of Böblingen. Göppingen came in third. The cities of Stuttgart and Karlsruhe as well as the districts of Schwäbisch Hall, Tuttlingen and Lörrach received special prizes. ZSW compiled the list of criteria for assessing measures and activities in the districts. On 15 November, the district delegates received the awards from the Director of the Ministry Helfmried Meinel in the Marble Hall of Neues Schloss in Stuttgart. 27 of the 44 urban and rural districts of Baden-Württemberg had participated. In 2016, for the first time, the Leitstern award accounted for efforts undertaken by the districts in all three energy sectors: electricity, heat and transport.

**// ZSW und HZB organisieren Workshop „IW-CIGSTech 7“ im Rahmen der EU-PVSEC**

Der Workshop zur CIGS-Technologie war als offizielles Parallel-Event der EU-PVSEC, der jährlich stattfindenden europäischen Photovoltaik-Tagung, organisiert. Rund 150 internationale Teilnehmer bekamen einen ausführlichen Überblick über die aktuellen wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen bei CIGS-Dünnschicht-Solarzellen und ihrer weltweiten industriellen Anwendung. Das Publikum kam in der Diskussion überein, dass die CIGS-Community in Folge des Ende 2015 veröffentlichten CIGS White Papers die CIGS-Technologie in einem wachsenden photovoltaischen Weltmarkt mit vereinten Kräften fördern solle. Ein Folge-workshop findet am 30. Mai 2017 am ZSW in Stuttgart statt. Nähere Informationen dazu gibt es unter [www.iw-cigstech.org](http://www.iw-cigstech.org).

**// ZSW and HZB organise IW-CIGSTech 7 workshop within the framework of EU-PVSEC**

The workshop on CIGS technology was organised as an official event held parallel to EU-PVSEC, the annual European Photovoltaic Conference. Some 150 international participants were given a detailed overview of current scientific and technological developments in CIGS thin-film photovoltaics and their worldwide industrial application. During the discussion, the audience agreed that the CIGS community ought to promote CIGS technology in a growing photovoltaic world market – in line with the CIGS White Paper published at the end of 2015. A follow-up workshop will be conducted on 30 May 2017 at ZSW in Stuttgart. Details are available at [www.iw-cigstech.org](http://www.iw-cigstech.org).



// Prof. Schock, Prof. Schlattmann (HZB) und ZSW-Vorstandsmitglied Prof. Powalla bei der Eröffnung von IW-CIGSTech 7 (li.); rege Diskussion im Publikum (re.).  
// Prof. Schock, Prof. Schlattmann (HZB) and ZSW board member Prof. Powalla at the opening of IW-CIGSTech 7 (left); lively discussion in the audience (right).





## // Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Über 300 Teilnehmer diskutierten auf den 15. Internationalen Ulmer Elektrochemischen Tagen (UECT).  
// Over 300 participants enjoyed discussions at the 15th Ulm Electrochemical Talks (UECT).



// Japanische Delegation aus Forschern und leitenden Beamten besucht das eLaB.  
// Japanese delegation of researchers and senior officials visits the eLaB.

**// 15. UECT: Experten diskutieren über Elektromobilität**  
Die 15. Internationalen Ulmer Elektrochemischen Tage (UECT) vom 20. bis 21. Juli 2016 waren hochkarätig besetzt. Unter anderem boten Vertreter von BMW, Daimler, Honda, Porsche, Samsung, Tesla und Varta die Gelegenheit, sich über die Zukunft der Schlüsseltechnologien der Elektromobilität auszutauschen. Insgesamt präsentierten rund 40 internationale Experten ihre Erkenntnisse zu Batterien, Wasserstoff und Brennstoffzellen. Der Fokus lag auf Materialien, verbesserten Komponenten und Erfahrungen aus der Praxis. Weitere Highlights waren die Verleihung des Poster-Awards für die besten wissenschaftlichen Ergebnisse und konstruktive Diskussionen in angenehmer Atmosphäre.

**// 15th UECT: experts discuss electromobility**  
The 15th International Ulm Electrochemical Talks (UECT) from the 20th to the 21st of July 2016 saw some high-ranking attendants. Delegates from BMW, Daimler, Honda, Porsche, Samsung, Tesla, Varta and other prominent companies took the opportunity to talk about the future of key electromobility technologies. Some 40 international experts presented their findings on batteries, hydrogen and fuel cells. The focus of their reports was on materials, better components and practical experiences. Further highlights included a poster exhibition with prizes for the best three scientific works and many opportunities for constructive discussions in a pleasant setting.

**// Abschlussveranstaltung der 67. Lindauer Nobelpreisträgertagung macht Station im ZSW**  
Im Anschluss an die diesjährige Nobelpreisträgertagung zum Thema Physik besuchten am 5. Juli ausgewählte Nachwuchswissenschaftler der Tagung das eLaB am Ulmer Standort. Hintergrund der von Baden-Württemberg International organisierten Tour war es, Doktoranden und Postdoktoranden, die sich für einen Forschungsaufenthalt in Baden-Württemberg interessieren, mit Universitäten und Forschungseinrichtungen des Landes bekannt zu machen.

**// Closing ceremony of the 67th Lindau Nobel Laureate Meetings at ZSW**  
After the Nobel prize meeting for physics this year, young scientists selected from the conference visited the eLaB in Ulm on 5 July. The tour, organised by Baden-Württemberg International, served to introduce regional universities and research institutes to doctoral students and postdoctoral researchers who are interested in a research stay in Baden-Württemberg.

**// Einweihung der 21. deutschen Wasserstofftankstelle am ZSW in Ulm**  
Daimler, Linde, Total und ZSW haben am 15. Juli in Ulm gemeinsam eine weitere Wasserstoffzapfsäule offiziell in Betrieb genommen. Neben Vertretern der beteiligten Unternehmen nahmen auch Repräsentanten des Bundes sowie des baden-württembergischen Umweltministeriums an der Einweihung teil.

**// Inauguration of the 21st German hydrogen fuelling station at ZSW in Ulm**  
On 15 July, Daimler, Linde, Total and ZSW officially commissioned another hydrogen fuel dispenser in Ulm. In addition to delegates from the participating companies, representatives of the German Federal Government and the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg took part in the inauguration.

**// Tankst Du noch oder stromst Du schon? E-Mobilitätstag in Ulm**  
Der Fokus der von unw e.V., BUND, Lokale Agenda 21, ZSW und WBZU organisierten Veranstaltung am 14. Oktober lag auf dem Erfahrungsaustausch zu aktuellen Entwicklungen bei der Elektromobilität in Baden-Württemberg und auf der Erarbeitung strategischer Ansätze für Ulm. ZSW-Vorstand Prof. Dr. Tillmetz eröffnete die Vortrags-Session mit einem globalen Überblick zum Thema „Elektromobilität – Globale Trends und Herausforderungen“. Der baden-württembergische Verkehrsminister Winfried Hermann, Oberbürgermeister Gunter Czisch, SWU-Geschäftsführer Klaus Eder, Thomas Bürkle vom Landesverband der Elektro- und Informationstechnik sowie der Präsident der IHK Ulm Dr. Peter Kulitz führten die Podiumsdiskussion.

**// Still refuelling, or already powering up? Electromobility day in Ulm**  
The focus of the event organised by unw e.V., BUND, Lokale Agenda 21, ZSW and WBZU held on 14 October was the exchange of experiences in current developments in electromobility in Baden-Württemberg and the development of strategic approaches for Ulm. ZSW Executive Prof. Dr. Werner Tillmetz opened the talk session with a global overview on the subject of “Electromobility – Global Trends and Challenges”. Minister of Transport Winfried Hermann, Mayor Gunter Czisch, SWU Managing Director Klaus Eder, Thomas Bürkle from Landesverband der Elektro- und Informationstechnik and the President of the IHK Ulm Dr. Peter Kulitz led the panel discussion.

**// Deutsch-japanischer Workshop zu Batterietechnologien**  
Im Rahmen des „German-Japan Joint Workshop on Advanced Secondary Battery Technologies“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung und der New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) besuchte eine japanische Delegation aus Forschern und leitenden Beamten der NEDO das eLaB. Das ZSW organisierte den zweitägigen Workshop mit Vorträgen exzellenter Wissenschaftler aus der Batterieforschung und stellte aktuelle Arbeiten zu den Themen Analytik und Produktionsforschung bei Lithium-Ionen-Batterien vor. Die NEDO verantwortet neue Energietechniken und Forschungsprojekten im Bereich der Industrietechnik.

**// German-Japanese workshop on battery technologies**  
A Japanese delegation of researchers and senior officials from New Energy and Industrial Technology Development Organisation (NEDO) visited the eLaB as part of the German-Japanese Joint Workshop on Advanced Secondary Battery Technologies conducted by the German Federal Ministry of Education and Research and NEDO. ZSW organised the two-day workshop with lectures held by brilliant scientists in the field of battery research and presented ongoing research on the topics of analysis and production research for lithium-ion batteries. NEDO is responsible for new energy technologies and research projects in the field of industrial engineering.



// V.l.n.r./f.l.t.r.: Einweihung der H<sub>2</sub>-Tankstelle in Ulm mit/Inauguration of the hydrogen fuelling station in Ulm with Philippe A. Tanguy (Total); Guillaume Larroque (Total), Helfried Meinel (BMUB), Klaus Bonhoff (NOW), Werner Tillmetz (ZSW), Christian Mohrdieck (Daimler), Dieter Prangenberg (Linde), Thomas Bystry (CEP).



// Veranstaltung im Stadthaus Ulm mit Roadshow am Münsterplatz zum Thema „Elektromobilität in und um Ulm“.  
// Event in Stadthaus Ulm with a roadshow at Münsterplatz on “Electromobility in and around Ulm”.





// Erstes Themenboot der Ulmer ZSWler beim größten Ulmer Feiertag „Nabada“ auf der Donau.  
 // First themed boat of Ulm's ZSW team during the most important holiday „Nabada“ in Ulm on the Danube.

## // Öffentlichkeitsarbeit Public Relations



// Das ZSW präsentierte Batterien und Brennstoffzellen auf der Hannover Messe im Baden-Württemberg Pavillon der eMobil BW.  
 // ZSW presented batteries and fuel cells at the Hanover Trade Fair in the Baden-Württemberg Pavilion of eMobil BW.



// Eike Hallitzky, Landesvorsitzender von Bündnis 90/Die Grünen und MdL Martin Stümpfig von der Grünen Fraktion im Bayerischen Landtag besuchen den ZSW-Stand auf der Intersolar.  
 // Eike Hallitzky, Regional Chairman of Bündnis 90/Die Grünen and Martin Stümpfig, Member of the Green Parliamentary Group in the Bavarian State Parliament visit the ZSW booth at Intersolar.

### // Delegation aus Großbritannien informiert sich über die Batterie- und Brennstoffzellenforschung

Eine britische Delegation besuchte am 13. Oktober Ulm, um die Aktivitäten der Universität Ulm, des Helmholtz-Instituts Ulm sowie des ZSW auf den Gebieten der Elektrochemie und der E-Mobilität kennenzulernen. Vorstandsmitglied Prof. Dr. Werner Tillmetz gab Einblicke in die globalen Entwicklungen der Elektromobilität, anschließend folgten Laborführungen. Die Reise wurde von Baden-Württemberg International in Kooperation mit dem UK Science and Innovation Network sowie der Landesagentur e-mobil BW organisiert. Die Teilnehmer waren überwiegend Wissenschaftler aus den Bereichen Batterie- und Brennstoffzellenforschung sowie E-Mobilität.

### // A Delegation from the United Kingdom came to learn more about battery and fuel cell research

A British delegation visited Ulm on 13 October to learn more about the activities of the University of Ulm, the Helmholtz Institute Ulm and ZSW in the fields of electrochemistry and electromobility. ZSW Executive Prof. Dr. Werner Tillmetz gave insights into the global development of electromobility, which was followed up with some laboratory tours. The visit was organised by Baden-Wuerttemberg International in cooperation with the UK Science and Innovation Network and the state agency e-mobil BW. Most of the participants were scientists in the fields of battery and fuel cell research as well as electromobility.

### // Delegation brasilianischer Baufachverbände besucht ZSW-Neubau in Stuttgart

Eine Delegation brasilianischer Baufachverbände aus dem Bundesstaat Rio de Janeiro besuchte auf Einladung des baden-württembergischen Wirtschaftsministeriums am 9. November das ZSW, um sich über Innovationen und den Einsatz erneuerbarer Energien am Bau zu informieren. Die Vorträge von ZSW, Solar Cluster Baden-Württemberg und der Manz AG zur Solarenergie in Deutschland, dem ZSW-Neubau und der Solaranlage aus CIGS-Dünnschichtmodulen stießen auf großes Interesse.

### // Delegation of Brazilian construction associations visits ZSW's new building in Stuttgart

A delegation of Brazilian building associations from the state of Rio de Janeiro visited ZSW on 9 November at the invitation of the Baden-Württemberg Ministry of Economics to learn about innovations and applications of renewable energies in construction. The lectures on solar energy in Germany, ZSW's new building and the solar power system made of CIGS thin-film modules that were held by ZSW, Solar Cluster Baden-Württemberg and Manz AG were very well-received.

// ZSW mit Tausenden auf und an den Ufern der Donau in Ulm  
 Begonnen hat die Tradition bereits zu Reichsstadtzeiten, für Ulmer ist es so etwas wie ein „Nationalfeiertag“: der Schwörmontag, der immer auf den dritten Montag im Juli fällt. Der Höhepunkt des Tages: das „Nabada“ (schwäbisch für „Hinunterbaden“) auf der Donau. Bei Sonnenschein zog es Ulmer Wissenschaftler zum ersten Mal mit eigenem Themenboot „Diesel Gate! Elektro kommt?“ ins kühle Nass. Das interdisziplinäre Projekt wurde von der Themenfindung bis zum Bootsbau in freiwilligen Einsätzen entworfen und umgesetzt.

// ZSW with thousands of celebrants on the banks of the Danube in Ulm  
 The tradition has its roots in the 14th century when Ulm was a Free Imperial City, and for the residents today it is something of a “national holiday”: the Schwörmontag, which is celebrated on the third Monday in July. The highlight of the day is: the “Nabada” (Swabian word used to describe the custom of rowing boats and rafts, often themed, down a river on Schwörmontag) on the Danube. Scientists in Ulm took part with their own boat for the first time, themed “Diesel Gate! Electro is coming?”. The interdisciplinary project was designed and implemented by ZSW volunteers, from topic finding to boat building.

### // Ausstellungen und Messen 2016:

31. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	9.–11.3.2016
Hannover Messe Industrie, Baden-Württemberg-Pavillon	25.–29.4.2016
Intersolar Europe, München	22.–24.5.2016
15. UECT, Blaubeuren	20.–21.7.2016
Tankst Du noch oder stromst Du schon? E-Mobilitätstag in Ulm	14.10.2016

### // Exhibitions and trade fairs 2016:

31st Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	9–11/3/2016
Hanover Industrial Trade Fair, Baden-Württemberg Pavillion	25–29/4/2016
Intersolar Europe, Munich	22–24/5/2016
15th UECT, Blaubeuren	20–21/7/2016
Still refuelling, or already powering up? Electromobility day in Ulm	14/10/2016



// Delegation aus Großbritannien informiert sich am ZSW über Elektrochemie.  
 // Delegation from Great Britain looks into electrochemistry at ZSW.



// PV-Experte Dieter Geyer vom ZSW erläutert das Energiekonzept des neuen ZSW-Gebäudes vor Vertretern brasilianischer Baufachverbände.  
 // PV expert Dieter Geyer from ZSW explains the energy concept of the new ZSW building to delegates of Brazilian construction associations.

### // Hannover Messe 2016 – ZSW im Baden-Württemberg-Pavillon

Zum 16. Mal zeigte das ZSW seine Kompetenz einem Fachpublikum aus aller Welt auf der Hannover Messe vom 25. bis 29. April unter dem Dach des Baden-Württemberg-Pavillons in der MobiliTec Area der Leitmesse ENERGY. Kernthemen des Gemeinschaftsstandes waren hybride und elektrische Antriebe, mobile und stationäre Energiespeicher, alternative Kraft- und Brennstoffe sowie ganzheitliche Mobilitätstechnologie-Lösungen. Das ZSW positionierte sich mit den Themen Batterien und Brennstoffzellen.

### // Hanover Industrial Trade Fair 2016 – Baden-Württemberg Pavilion

For the 16th time, ZSW presented its expertise to trade visitors from all over the world at the Hanover Industrial Trade Fair from 25 to 29 April, all under the roof of the Baden-Württemberg Pavilion in the MobiliTec Area for the side trade show ENERGY. Key topics at the joint stand were hybrid and electric drives, mobile and stationary energy storage systems, alternative power sources and fuels as well as integrated mobility technology solutions. ZSW promoted the topics of batteries and fuel cells.

## // Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

### // Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist aufgrund der attraktiven Themen des Instituts weiterhin erfolgreich. 2016 wurde insgesamt 1.860 Mal über das ZSW berichtet – das ist das beste Ergebnis seit Beginn der systematischen Zählung im Jahr 2006. Auch 2016 war das Institut wieder mehrmals in den wichtigsten überregionalen und regionalen Leitmedien wie Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Handelsblatt, Wirtschaftswoche, SWR, Stuttgarter Zeitung usw. vertreten.

Die quantitativ beste Resonanz in den Medien erzielten folgende ZSW-Pressemitteilungen:

- > Erneuerbaren-Anteil liegt 2016 bei rund 32 %
- > Rekord für Perovskit-CIGS-Tandem-Solarmodul
- > Power-to-Gas-Leuchtturmprojekt: Betreiber und Standort gefunden
- > Zahl der Elektroautos weltweit auf 1,3 Millionen gestiegen
- > Lithium-Ionen-Batterien aus Deutschland

### // Media relations

Because of the attractive issues dealt with by the institute, ZSW has been able to continue its successful public relations work. In 2016, ZSW was reported on about 1,860 times – the best ever result since counting started in 2006. In 2016, as in previous years, the institute was repeatedly mentioned in major national and regional mainstream media such as Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Handelsblatt, Wirtschaftswoche, SWR, Stuttgarter Zeitung, etc.

From a quantitative point of view, the best received ZSW press reports were:

- > Renewables account for around 32% in 2016
- > Record for perovskite/CIGS solar module
- > Power-to-Gas flagship project: operator and location acquired
- > Number of electric cars worldwide climbs to 1.3 million
- > Lithium-ion batteries from Germany



// Der Internetauftritt des ZSW im neuen Gewand.  
// New design for ZSW web presence.



// Nicht nur neues Design: ZSW-Fachbroschüre „Elektrochemie und Energie“.  
// Not only a new look: the new ZSW technical brochure “Electrochemistry and Energy”.

### // Relaunch des Internetauftritts

Im Mai 2016 wurde der neue Internetauftritt des ZSW live geschaltet. Das Layout wurde grundlegend überarbeitet und erscheint jetzt in einem zeitgemäßen Design. Weitere Ziele des Relaunchs waren, die Seiten fit für die Zukunft zu machen und der zunehmenden Nutzung von mobilen Endgeräten anzupassen. Die neue Website hat jetzt ein responsives Design, das heißt, sie ist auf jedem Endgerät – sei es PC, Laptop, Smartphone oder Tablet – bequem lesbar. Neu ist auch die erweiterte und verbesserte Darstellung der Forschungsthemen, die über die Hauptnavigation und direkt von der Startseite aus erreichbar sind. Die Presse hat einen eigenen Bereich bekommen, während Downloads, Publikationen, Vorlesungen und Veranstaltungen in der Mediathek zu finden sind ([www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)).

### // Neue ZSW-Fachbroschüre „Elektrochemie und Energie“

Die neue Broschüre „Elektrochemie und Energie“ beschreibt die aktuellen Arbeiten zu Batterien, Wasserstoff und Brennstoffzellen am Ulmer Standort. In kurzen Artikeln werden die Forschungs- und Entwicklungstrends bei Materialien, Modellierung und Simulation, Komponenten, Systemen und Produktionstechnologien sowie der Themenbereiche Test und Sicherheit dargestellt. Die Broschüre kann als PDF-Datei unter [www.zsw-bw.de/nc/mediathek/downloads/broschueren-flyer.html](http://www.zsw-bw.de/nc/mediathek/downloads/broschueren-flyer.html) heruntergeladen oder per Post bestellt werden.

### // Web presence relaunch

In May 2016, the new ZSW website went online. The layout has been thoroughly reworked with a more contemporary design. Other goals of the relaunch were to make the web pages fit for the future and adapt them to the increasing use of mobile devices. The new website now has a responsive web design, which means it is easily readable on any device – be it a PC, laptop, smartphone or tablet. Another new feature is the expanded and improved presentation of research topics, which can be accessed via the main navigation menu and the homepage. The press has its own section, while downloads, publications, lectures and events are in the media library ([www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)).

### // New ZSW technical brochure “Electrochemistry and Energy”

The new brochure “Electrochemistry and Energy” describes ongoing work on batteries, hydrogen and fuel cells in Ulm. The brief articles present research and development trends in materials, modelling and simulation, components and systems and production technologies as well as the topics of tests and safety. The brochure can be downloaded as a PDF at <https://www.zsw-bw.de/nc/en/media-center/downloads/trade-brochures.html>, or ordered by mail.



// Dokumentation

// Documentation

# // Finanzielle Entwicklung

## Financial development



### // Einnahmen – Ausgaben

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 35,8 Mio. Euro und damit über dem Wert des Vorjahres. Wesentliche Ursache dafür waren höhere Einnahmen im Jahr 2016 aus öffentlichen Zuwendungen für Projekte.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2016 um 0,1 Mio. auf 4,4 Mio. Euro.

### // Revenue – expenditure

In the past year, the income volume from normal business activities was 35.8 million euros and thus considerably higher than in the previous year. This result is mainly due to the fact that more revenue was received from public grants for projects in 2016.

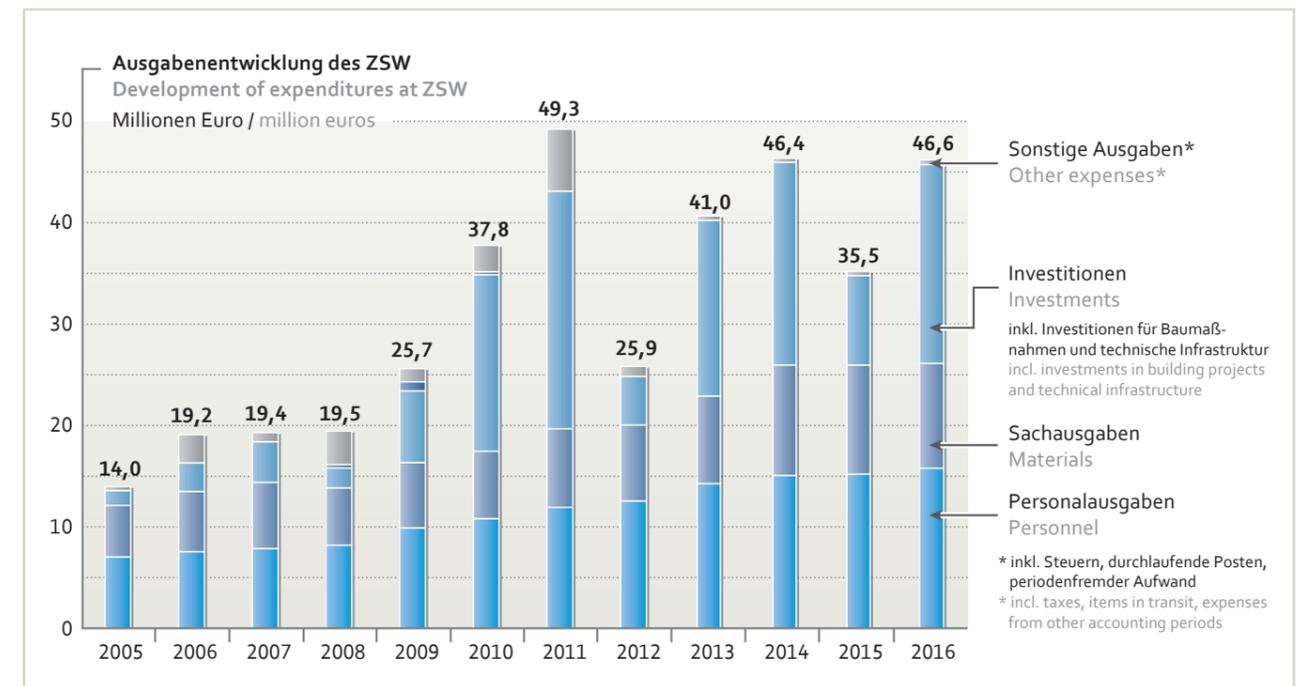
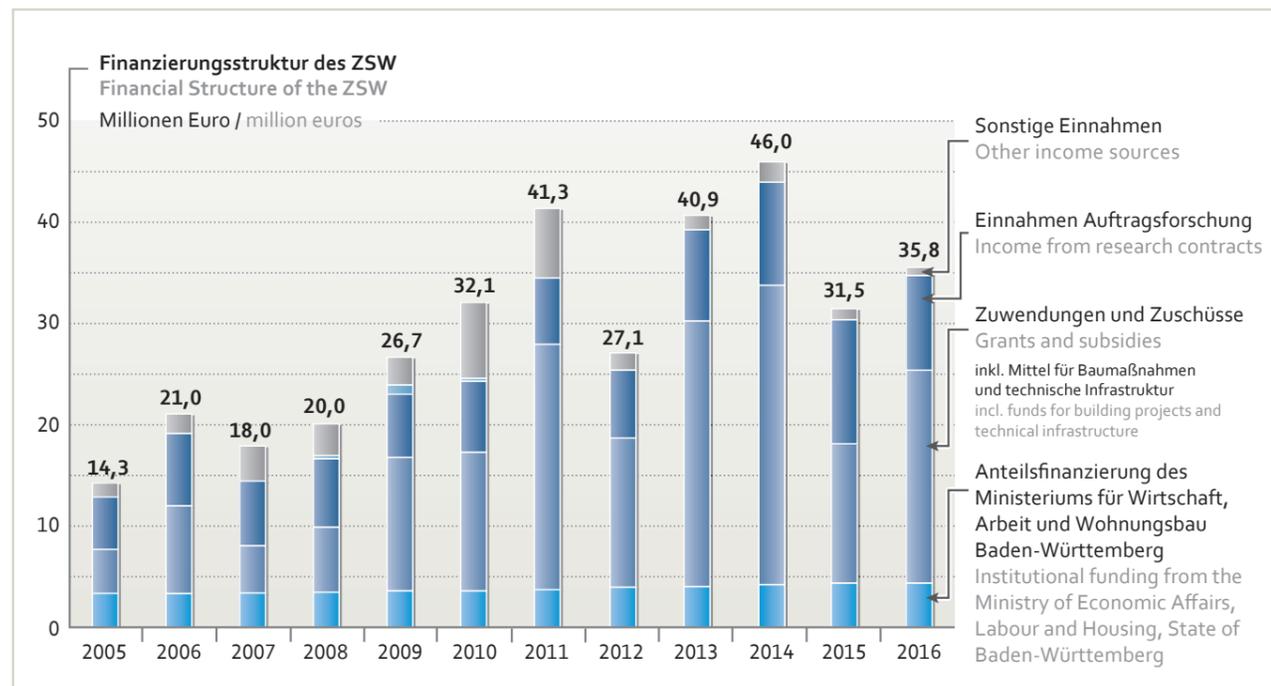
The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased by 0.1 million to 4.4 million euros in 2016.

Das korrespondierende Ausgabenvolumen erhöhte sich gegenüber dem Vorjahr auf 46,6 Mio. Euro, im Wesentlichen durch Investitionsausgaben für einen Institutsneubau in Stuttgart, der größtenteils langfristig durch Darlehen finanziert ist.

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

The corresponding expenditure volume was increased to 46.6 million euros relative to the previous year, mainly due to investment expenditure for a new institute building in Stuttgart, which has largely been financed by long-term loans.

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 209 Vollzeitstellen auf 216 erhöht. Das entspricht einer Mitarbeiterzahl von 235. Mit einem Anteil von 82 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau. Gut 10 % der Beschäftigten, die zum Jahresende am ZSW tätig waren, hatten eine ausländische Staatsbürgerschaft.

Der Frauenanteil lag bei knapp einem Drittel. 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 Mitarbeiter sind unser Erfolgsfaktor. Das ZSW stellt deshalb ein breites Spektrum an Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen zur Verfügung. Es umfasst fachspezifische und fachübergreifende Inhalte ebenso wie Angebote zur Persönlichkeitsentwicklung und Schulungen für Führungskräfte. Das Interesse daran ist groß. Insgesamt fanden im Berichtsjahr über 25 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt 120 Beschäftigte teilnahmen. Darüber hinaus standen im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements am ZSW Angebote zu den Themen Bewegung, Stressprävention, Ernährung und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm.

### // Staff development

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

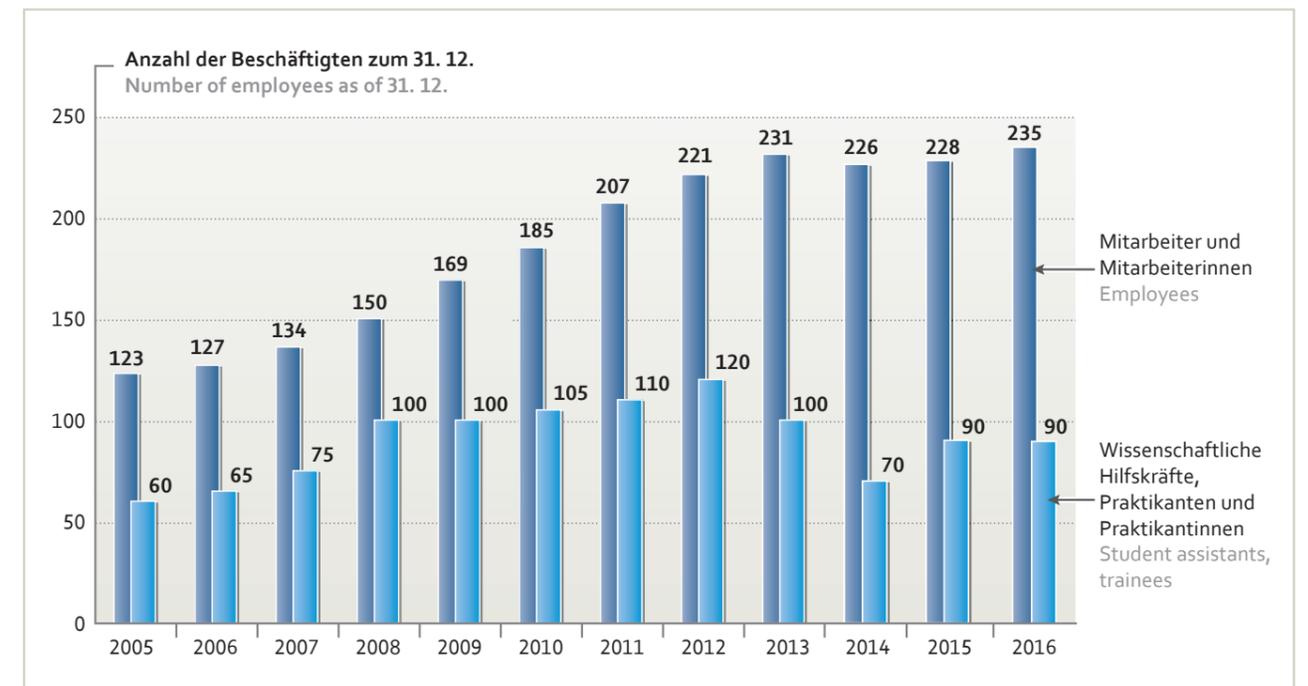
Employee capacity increased from 209 to 216 full-time equivalents in 2016. This corresponds to 235 employees. With 82% of all staff active in the scientific and technical area, productivity remains at a stable high level. At the end of the year, almost 10% of the staff employed at the institute had foreign citizenship.

Women constitute almost one third 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 and, in this way, facilitate a good work-life balance.

Our highly-qualified and motivated employees are ZSW's key success factor. ZSW therefore offers a broad range of training and continuing professional development with both specialist and interdisciplinary content, as well as personal development and executive training. The employees are very interested in this offer: more than 25 events were held, with a total of 120 employee participants. Moreover, in the framework of the institute's corporate health management, ZSW once again offered numerous programmes on exercise, stress prevention, nutrition and workplace ergonomics.

Einen hohen Stellenwert nehmen die Vernetzung des ZSW mit Hochschuleinrichtungen, die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten ein. Daher waren 2016 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 90 Studierende und Praktikanten am ZSW beschäftigt. Ein Drittel von ihnen hat ausländische Wurzeln. Im Berichtsjahr fertigten 20 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertation an.

The institute prioritises networking with universities, active involvement of ZSW employees in academic education through providing lectures, seminars and practical training as well as supervising final theses and dissertations. As a result, in addition to the staff employees, ZSW also employed 90 students and interns in 2016. One third of these has a foreign background. In the reporting year, 20 doctoral candidates completed their doctoral theses.



## // Ausgewählte Veröffentlichungen

### Selected Publications



#### // Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften

##### Publications in Books and Journals

- / Abzieher T., Schnabel T., Hetterich M. (KIT), Powalla M., Ahlswede E.; **Source and effects of sodium in solution-processed kesterite solar cells**; *Physica Status Solidi A* 213, No. 4, 1039-1049 (2016); <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201532619>
- / Arndt W.-H. (TU Berlin) (Hrsg.), Döge N. (TU Berlin) (Hrsg.), Marker S. (TU Berlin) (Hrsg.), ZSW: Danzer M., Bauer M., Günther C., Taumann; **Elektrifizierungspotenzial kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen – komDRIVE**; Universitätsverlag der TU Berlin, 2016, ISBN 978-3-7983-2801-3
- / Bauer A., Sharbati S. (Semnan Univ.), Powalla M.; **Systematic survey of suitable buffer and high resistive window layer materials in  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  solar cells by numerical simulations**; *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2017; <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.035>
- / Bauer M., Wachtler M., Stöwe H., Persson J., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Understanding the dilation and dilation relaxation behavior of graphite-based lithium-ion cells**; *Journal of Power Sources* 317 (2016) 93-102; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.078>
- / Friedlmeier T., Jackson P., Bauer A., Hariskos D., Kiowski O., Menner R., Würz R., Powalla M.; **High-efficiency  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  solar cells**; *Thin Solid Films* (2016) / Proc. of 2016 E-MRS Spring Meeting and Exhibit, Lille, 2-6 May 2016; <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2016.08.021>
- / Gabrielli G., Axmann P., Diemant T. (Univ. Ulm), Behm R.-J. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Combining optimized  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  particle morphology and  $\text{LiNbO}_3$  coating for long cycling-life graphite/ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  full cells**; *ChemSusChem*, 9 (13) 1670-1679 (2016); <http://dx.doi.org/10.1002/cssc.201600278>
- / Gabrielli G., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Study of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  morphological features for reduced electrolyte decomposition at high potential**; *Journal of the Electrochemical Society* (2016) 163, 3, A470-A476; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0541603jes>
- / Ghanbari N., Waldmann T., Kasper M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Inhomogeneous degradation of graphite anodes in Li-ion cells: a post-mortem study using glow discharge optical emission spectroscopy (GD-OES)**; *Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120 (39), pp 22225-22234; <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b07117>
- / Gößling S. (ZBT), Klages M., Haußmann J., Beckhaus P. (ZBT), Messerschmidt M., Arlt T. (HZB), Kardjilov N. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J., Heinzl A. (ZBT); **Analysis of liquid water formation in polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell flow fields with a dry cathode supply**; *Journal of Power Sources* 306 (2016) 658-665; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.060>
- / Hanisch J., Wahl T., Wessendorf C., Ahlswede E.; **Efficient polymer tandem modules and solar cells by doctor blading**; *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4, 4771-4775; <http://dx.doi.org/10.1039/C5TA10257J>
- / Hariskos D., Jackson P., Hempel W., Menner R., Spiering S.; **Method for a high-rate solution deposition of  $\text{Zn(O,S)}$  buffer layer for high-efficiency  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ -based solar cells**; 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, 5-10 June 2016, IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 6, No. 5, Sept. 2016; <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2589361>
- / Jackson P., Würz R., Hariskos D., Lotter E., Witte W., Powalla M.; **Effects of heavy alkali elements in  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  solar cells with efficiencies up to 22.6%**; *Physica Status Solidi RRL* 10, No. 8, 583-586 (2016); <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201600199>
- / Kätzel J. (HZB), Markötter H. (HZB), Arlt T. (HZB), Klages M., Haußmann J., Messerschmidt M., Kardjilov N. (HZB), Scholta J., Banhart J. (HZB), Manke I. (HZB); **Effect of ageing of gas diffusion layers on the water distribution in flow field channels of polymer electrolyte membrane fuel cells**; *Journal of Power Sources* 301 (2016) 386-391; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.004>
- / Kelm T.; **Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2015**; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg.), Oktober 2016
- / Klages M., Tjønnås J. (SINTEF), Zenith F. (SINTEF), Halvorsen J. (SINTEF), Scholta J.; **Dual control of low concentration CO poisoning by anode air bleeding of low temperature PEM fuel cells**; *Journal of Power Sources* 336 (2016) 212-223; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.10.055>
- / Klein A., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Synergetic effects of  $\text{LiFe}_{0.3}\text{Mn}_{0.7}\text{PO}_4$ - $\text{LiMn}_{1.9}\text{Al}_{0.1}\text{O}_4$  blend electrodes**; *Journal of Power Sources* 309 (2016) 169-177; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.093>
- / Klein A., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Origin of the synergetic effects of  $\text{LiFe}_{0.3}\text{Mn}_{0.7}\text{PO}_4$  – spinel blends via dynamic in-situ X-ray diffraction measurements**; *Journal of the Electrochemical Society* (2016) 163, 9 A1936-A1940; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0741609jes>
- / Löschel A. (Univ. Münster), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F., Ziesing H.-J. (AGEB); **Stellungnahme zum fünften Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2015**; Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Berlin, Münster, Stuttgart, Dezember 2016
- / Mancini M., Axmann P., Gabrielli G., Kinyanjui M. (Univ. Ulm), Kaiser U. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **A high-voltage and high-capacity  $\text{Li}_{1-x}\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  cathode material – from synthesis to full lithium-ion cell**; *ChemSusChem*, 9 (14) 1843-1849 (2016); <http://dx.doi.org/10.1002/cssc.201600365>
- / Mancini M., Gabrielli G., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electrochemical performance and phase transitions between 1.5 and 4.9 V of highly-ordered  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  with tailored morphology: Influence of the lithiation method**; *Journal of the Electrochemical Society* (2017) 161, 1 A6229-A6235; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0291701jes>
- / Marinaro M., Weinberger M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Toward pre-lithiated high areal capacity silicon anodes for lithium-ion batteries**; *Electrochimica Acta* 206 (2016) 99-107; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2016.03.139>
- / Menner R., Cemernjak M., Paetel S., Wischmann W.; **Application of indium zinc oxide window layers in  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  solar cells**; *Thin Solid Films* (2016) / Proc. of 2016 E-MRS Spring Meeting and Exhibit, Lille, 2-6 May 2016; <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2016.08.026>
- / Müller R. (Freudenberg), Klages M., Bardl G. (TU Dresden), Cherif C. (Freudenberg), Scholta J.; **Automatisierte Bestimmung von Faserorientierung und Gesamtstruktur technischer Vliesstoffmaterialien aus  $\mu$ -CT-basierten Modellen**; *Schweizer Textilschrift „Textil Plus“* 2016
- / Mundsinger M. (Univ. Ulm), Farsi S., Rapp M., Golla-Schindler U. (Univ. Ulm), Kaiser U. (Univ. Ulm), Wachtler M.; **Morphology and texture of spheroidized natural and synthetic graphites**; *Carbon* 111 (2017) 764-773; <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2016.10.060>
- / Nauroozi D. (Univ. Ulm), Pejic M., Schwartz P.-O. (Univ. Ulm), Wachtler M., Bäuerle P. (Univ. Ulm); **Synthesis and solvent-free polymerisation of vinyl terephthalate for application as anode material in organic batteries**; *RSC Advances* (2016) 6, 111350-111357; <http://dx.doi.org/10.1039/C6RA24064J>
- / Pournemat A., Wilhelm F., Haußmann J. (KIT), Vierrath S. (Univ. Freiburg), Thiele S. (Univ. Freiburg), Scholta J.; **A Monte Carlo study on the effect of structural and operating parameters on the water distribution within the microporous layer and the catalyst layer of PEM fuel cells**; *ECS Transactions* 75 (14) 157-165 (2016); <http://dx.doi.org/10.1149/07514.0157ecst>
- / Schmidt M., Kelm T., Jachmann H., Fuchs A.-L., Metzger J.; **Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg – Schwerpunkte Versorgungssicherheit und Effizienztrends, Statusbericht 2016**; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Hg), Dezember 2016
- / Schnabel T., Ahlswede E.; **On the interface between kesterite absorber and Mo back contact and its impact on solution-processed thin-film solar cells**; *Solar Energy Materials & Solar Cells* 159 (2017) 290-295, available online 24 Sept. 2016; <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.09.029>
- / Schwarz R., Pejic M., Fischer P., Marinaro M., Jörissen L., Wachtler M.; **Magnesium-based electrolytes – A new class of electrolytes for magnesium batteries**; *Angewandte Chemie International Edition* 2016, 55, 14958-14962; <http://dx.doi.org/10.1002/anie.201606448>
- / Secchiarioli M., Marassi R. (Camerino Univ.), Wohlfahrt-Mehrens M., Dsoke S.; **The synergetic effect of activated carbon and  $\text{Li}_3\text{V}_{1.95}\text{Ni}_{0.05}(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  for the development of high energy and power electrodes**; *Electrochimica Acta* 219 (2016) 425-434; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2016.10.027>
- / Specht M., Brellocks J., Frick V., Stürmer B.; **The power-to-gas process: Storage of renewable energy in the natural gas grid via fixed bed methanation of  $\text{CO}_2/\text{H}_2$** ; in: „Synthetic Natural Gas from Coal, Dry Biomass, and Power to Gas Applications“, Eds. Tilmann J. Schildhauer and Serge M. A. Billaz, John Wiley & Sons Inc., p. 191 (2016)
- / Specht M., Brellocks J., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U.; **Technical realization of power-to-gas technology (P2G): Production of substitute natural gas by catalytic methanation of  $\text{H}_2/\text{CO}_2$** ; in „Natural Gas and Renewable Methane for Powertrains – Future Strategies for a Climate-Neutral Mobility“, Ed. Richard van Basshuysen, Springer International Publishing AG Switzerland, p. 141 (2016), ISBN 978-3-319-23224-9
- / Spiering S., Nowitzki A., Kessler F., Igalson M. (Warsaw Univ.), AbdelMouk H. (Warsaw Univ.); **Optimization of buffer-window layer system for CIGS thin-film devices with indium sulphide buffer by in-line evaporation**; *Solar Energy Materials & Solar Cells* 144 (2016) 544-550; <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.038>
- / Waldmann T., Hogg B.-I., Kasper M., Grolleau S. (EIGSI), Gutiérrez Couceiro (IK4-CIDETEC), Trad K. (Vito), Pilipili Matadi B. (Univ. Grenoble), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Interplay of operational parameters on lithium deposition in lithium-ion cells – Systematic measurements with reconstructed 3-electrode pouch full cells**; *Journal of the Electrochemical Society* (2016) 163, 7, A1232-A1238; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0591607jes>
- / Waldmann T., Iturrondobeitia A. (CIC EnergiGUNE), Kasper M., Ghanbari N., Aguesse F. (CIC EnergiGUNE), Bekaert E. (CIC EnergiGUNE), Daniel L. (Univ. Grenoble), Genies S. (Univ. Grenoble), Jiménez Gordon I. (Univ. Grenoble), Löble W. (KIT), De Vito (Univ. Grenoble), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Review – Post-mortem analysis of aged lithium-ion batteries: disassembly methodology and physico-chemical analysis techniques**; *Journal of the Electrochemical Society* (2016) 163, 10, A2149-A2164; <http://dx.doi.org/10.1149/2.1211609jes>
- / Weideler A. (terrane), Zuberbühler U., Stürmer B., Bauer J. (terrane); **Erfahrungen mit der Gasbeschaffenheitsmessung an einer Power-to-Gas-Anlage mit einem eichfähigen Prozessgaschromatographen**; *DVGW Energie / Wasser Praxis*, Jg. 67 Nr. 2, 2016, S. 23-27
- / Weinberger M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Novel strategies towards the realization of larger lithium sulfur/silicon pouch cells**; *Electrochimica Acta* 191 (2016) 124-132; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.150>
- / Wessendorf C., Perez A. (ICMAB), Hanisch J., Arndt A. (KIT), Ata I. (Univ. Ulm), Schulz G. (Univ. Ulm), Quintilla A. (KIT), Bäuerle P. (Univ. Ulm), Lemmer U. (KIT), Wochner P. (FKF-MPI), Ahlswede E., Barrera E. (ICMAB); **Understanding the effect of solvent vapor annealing on solution-processed A-D-A oligothiophene bulk-heterojunction solar cells: The role of alkyl side chains**; *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4, 2571-2580; <http://dx.doi.org/10.1039/C5TA07713C>
- / Witte W., Abou-Ras D. (HZB), Hariskos D.; **Improved growth of solution-deposited thin films on polycrystalline  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$** ; *Physica Status Solidi RRL* 10, No. 4, 300-304 (2016); <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201510454>
- / Zhang T., Fuchs B., Secchiarioli M., Wohlfahrt-Mehrens M., Dsoke S.; **Electrochemical behavior and stability of a commercial activated carbon in various organic electrolyte combinations containing Li-salts**; *Electrochimica Acta* 218 (2016) 163-173; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.126>



## // Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications

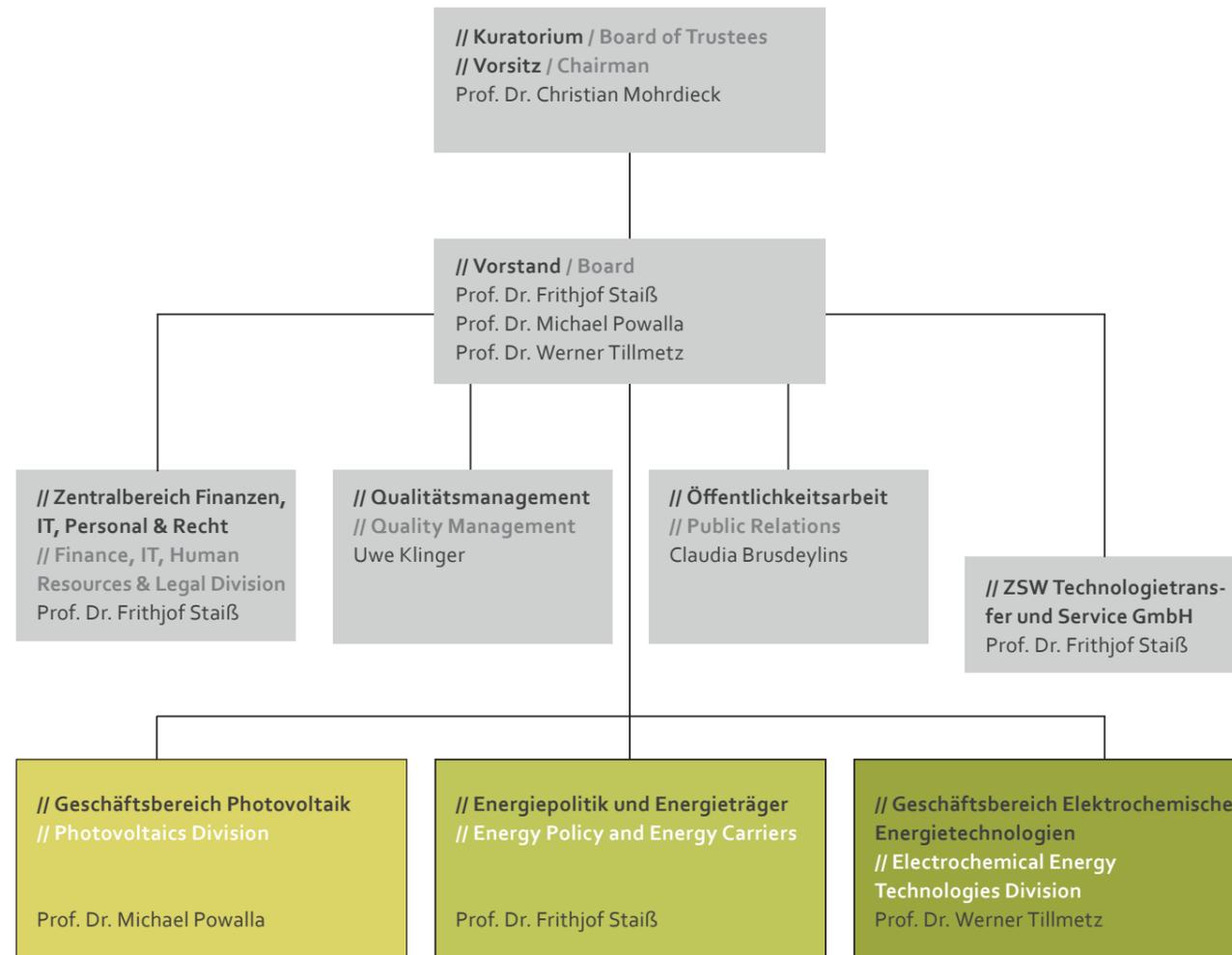
### // Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

- / Bauer M., Szaunig J., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Analyzing heat generation and heat transfer in lithium-ion cells by means of thermal impedance spectroscopy**; 15th UECT - Ulm ElectroChemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Bauer M., Wachtler M., Persson J., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Analyzing the dilation and dilation relaxation behavior of graphite-based lithium-ion cells**; 18th International Meeting on Lithium Batteries (IMLB), Chicago, 19-24 June 2016
- / Braunwarth W.; **Manufacturing of Li-ion cells**; 15th UECT – Ulm Electro-Chemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Brinner A., Friedrich K. (DLR), Groß B. (IZES), Hebling C. (ISE), v. d. Kroll R. (HZB), Müller M. (FZ Jülich), Schmidt A. (UFZ); **F&E-Perspektiven der Wasserstoff-Technologien**; FVEE-Jahrestagung 2016: Forschung für die Energiewende – Die Gestaltung des Energiesystems, Berlin, 2./3.11.2016
- / Danzer M. (Univ. Bayreuth), Bauer M., Schindler S. (HIU), Petzl M. (HIU); **Detection and characterization of lithium plating in commercial cells**; AABC Europe 2016, Mainz, 25-28 Jan. 2016
- / Döring H.; **Safety issues for lithium batteries**; 10. Battery Experts Forum der Batteryuniversity GmbH, Aschaffenburg, 6.4.2016
- / Friedlmeier T., Jackson P., Kreikemeyer-Lorenzo D. (KIT), Hauschild D. (KIT), Kiowski O., Hariskos D., Weinhardt L. (KIT), Heske C. (KIT), Powalla M.; **A closer look at initial CdS growth on high-efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> absorbers using surface-sensitive methods**; 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, 5-10 June 2016
- / Günther C., Golla-Schindler (HS Aalen), Behn S. (HS Aalen), Breninek A. (HS Aalen), Bauer M., Zeibig D. (HS Aalen), Bach P. (HS Aalen), Bernthaler T. (HS Aalen), Knoblauch V. (HS Aalen), Schneider G. (HS Aalen), Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Aging of traction batteries in vehicle-to-grid-application: Case study and post mortem analysis**; 15th UECT - Ulm ElectroChemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Günther C., Schwarz S., Bauer M., Taumann M., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Residual value and total costs of ownership of electric vehicle batteries**; 15th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Hanisch J., Hempel W., Wessendorf C.; **Diffusion and segregation in inorganic and organic thin-film solar cells**; SIMS Europe 2016, Münster, 18-20 Sept. 2016
- / Hanisch J., Wahl T., Ahlswede E.; **Comparison of different deposition methods for the aluminum back contact for inverted perovskite solar cells**; International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (HOPV16), Swansea, 28 June - 1 July 2016
- / Hempel W., Wischmann W.; **Influence of CIGS surface conditioning on GDOES depth profile measurement results**; 8th GD Day 2016, Gif sur Yvette, 15-16 Sept. 2016
- / Hoffmann A.; **Processing of water based electrodes and their properties in Li-ion cells**; Battery Experts Forum, Aschaffenburg, 5-7 April 2016
- / Kabza A.; **Lifetime investigation of automotive fuel cell stacks – results from FCH-JU AutostackCORE**; SecondAct Internal Workshop on Durability Issues in PEMFC and DMFC, Milano, 19 May 2016
- / Kabza A.; **Stack testing protocols and characterization**; 2nd Challenges for Fuel Cells and Hydrogen Technologies: From Innovation to Industry Workshop, CEA, Grenoble, 19-21 Sept. 2016
- / Kabza A.; **Stack testing: performance and durability**; 2nd IMPACT Workshop on Degradation and Performance Issues of Fuel Cells for Automotive Applications, Stuttgart, 12 Oct. 2016
- / Kabza A., Hunger J.; **MANufacturing improved stack with textured surface electrodes for stationary and CHP applications**; 15th UECT – Ulm Electro-Chemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Kiowski O., Jackson P., Bauer A., Powalla M.; **Optical loss analysis of CIGS solar cells**; 32nd EU-PVSEC 2016, München, 20-24 June 2016
- / Klages M., Zenith F. (SINTEF), Tjønås J. (SINTEF), Scholta J.; **Investigation of low concentration CO poisoning and anode air bleeding of fuel cells with varying membrane electrode assemblies**; Fuel Cells Science & Technology 2016, Glasgow, 13-14 April 2016
- / Klee Barillas J.; **Batteriespeicher vor dem Durchbruch?**; Energie Zukunft Tirol – Speichersysteme der Zukunft, Innsbruck, 11.4.2016
- / Klee Barillas J., Mathiss B., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Dynamic control of distributed energy storage systems via a dynamic infeed limit to contribute to the power grid stability**; 10th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Düsseldorf, 15-17 March 2016
- / Klee Barillas J., Szaunig J., Marius B., Wagner A., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Electro-thermal characterization of electrochemical cells**; 15th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Kogler W., Schnabel T., Ahlswede E.; **Ge-alloyed Cu<sub>2</sub>Zn(Sn,Ge)(S,Se), solar cells with CdS and In<sub>2</sub>S<sub>3</sub> buffer layer**; 7th European Kesterite Workshop, Leuven, 17-18 Nov. 2016
- / Lotter E., Jackson P., Paetel S., Wischmann W.; **Identification of loss mechanisms in CIGS micro-cells for concentrator applications**; 32nd EU PVSEC 2016, München, 20-24 June 2016
- / Marquardt-Möllenstedt T., Brellochs J., Specht M., Bauer B. (Bauer Holzenergie) Bauer M. (Bauer Holzenergie); **Erprobung von Kalkstein in einer 6-MW-Holzvergasungsanlage**; DGMK-Fachbereichstagung „Konversion von Biomassen“, Rotenburg a. d. F., 9.-11.5.2016, DGMK-Tagungsbericht 2016-2 (ISBN 978-3-941721-65-4)
- / Mohseninia A., Klages M., Bergbreiter C., Scholta J.; **Investigation of GDL water saturation parameters with varying morphology and wetting behaviour**; 15th UECT - Ulm ElectroChemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Paetel S.; **Roadmap CIGS towards 25% efficiency**; IW-CIGS Tech7, 7th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology, München, 20-24 June 2016
- / Pournemat A., Wilhelm F., Haußmann J., Scholta J., Thiele S. (Univ. Freiburg), Vierrath S. (Univ. Freiburg); **A Monte Carlo study on the effect of structural and operating parameters on the water distribution within the microporous layer of PEM fuel cell GDLs**; Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid State Science (PRIME), Honolulu, 2-7 Oct. 2016
- / Schnabel T., Ahlswede E.; **Different pathways to solution-processed Cu<sub>2</sub>ZnGeS<sub>4</sub>Se<sub>4-x</sub> absorbers for thin-film solar cells**; 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, 5-10 June 2016
- / Schwientek M., Scholta J., Wilhelm F., Küber P., Mantz H. (Hochschule Ulm); **Mobile data logging system for fuel cell stacks for automotive applications**; 15th UECT – Ulm ElectroChemical Talks 2016, Blaubeuren, 20-21 July 2016
- / Tost A., Brugger W., Braunwarth W., Stern R., Tillmetz W.; **Semi-industrial research production of PHEV1 lithium-ion batteries in Europe**; Batterieforum Deutschland 2016, Berlin, 6.-8.4.2016
- / Tost A., Brugger W., Stern R., Tillmetz W.; **Unique research production facility for lithium-ion batteries in Europe**; Kraftwerk Batterie 2016, Münster, 26.-27.4.2016
- / Wachtler M., Hess S., Waldmann T., Ghanbari N., Kasper M., Axmann P., Döring H., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Safety issues for lithium-ion batteries: From materials to complete cells**; 16. AABC, Detroit, 14-17 June 2016
- / Witte W., Jackson P., Hariskos D., Kessler F., Buecheler S. (EMPA), Carron R. (EMPA), Avancini E. (EMPA), Bissig B. (EMPA), Siebentritt S. (Univ. of Luxembg.), Werner F. (Univ. of Luxembg.), Wolter M. (Univ. of Luxembg.), Pareige P. (GPdM), Moguerou P. (GPdM), Duguay (GPdM), Cadel E. (GPdM), Castro C. (GPdM), Raghuvanshi M. (GPdM), Menozzi R. (Univ. of Parma), Sozzi G. (Univ. of Parma), Bourgeois E. (IMEC), Degutis G. (IMEC), Hardy A. (IMEC), Bär M. (HZB), Wilks R. (HZB), Kunze T. (HZB), Sadewasser S. (INL), Nicoara N. (INL), Puska M. (Aalto Univ.), Fedina M. (Aalto Univ.), Komsa H.-P. (Aalto Univ.), Havu V. (Aalto Univ.), Bremaud D. (Flisom), Dimmler B. (MCT), Wächter R. (MCT), Tiwari A. (EMPA); **Super high efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells approaching 25%: Results of the EU project Sharc25**; 32nd EU PVSEC 2016, München, 20-24 June 2016
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **High voltage cathode materials for Lithium ion batteries**; CIBF 2016, Shenzhen, 24-26 May 2016
- / Wohlfahrt-Mehrens M., Axmann P., Gabrielli G., Mancini M.; **Improved cathode materials for next generation lithium-ion batteries**; IBA2016, International Battery Association, Nantes, 20-25 March 2016
- / Zuberbühler U., Specht M., Jachmann H., Schwarz S., Stürmer B., Feigl B., Steiert S.; **Automatic operation of a power-to-gas plant based on simulated timetables in scenarios with high shares of renewable power and the development of a smart gas grid injection concept**; IRES, Düsseldorf, 15-17 March 2016

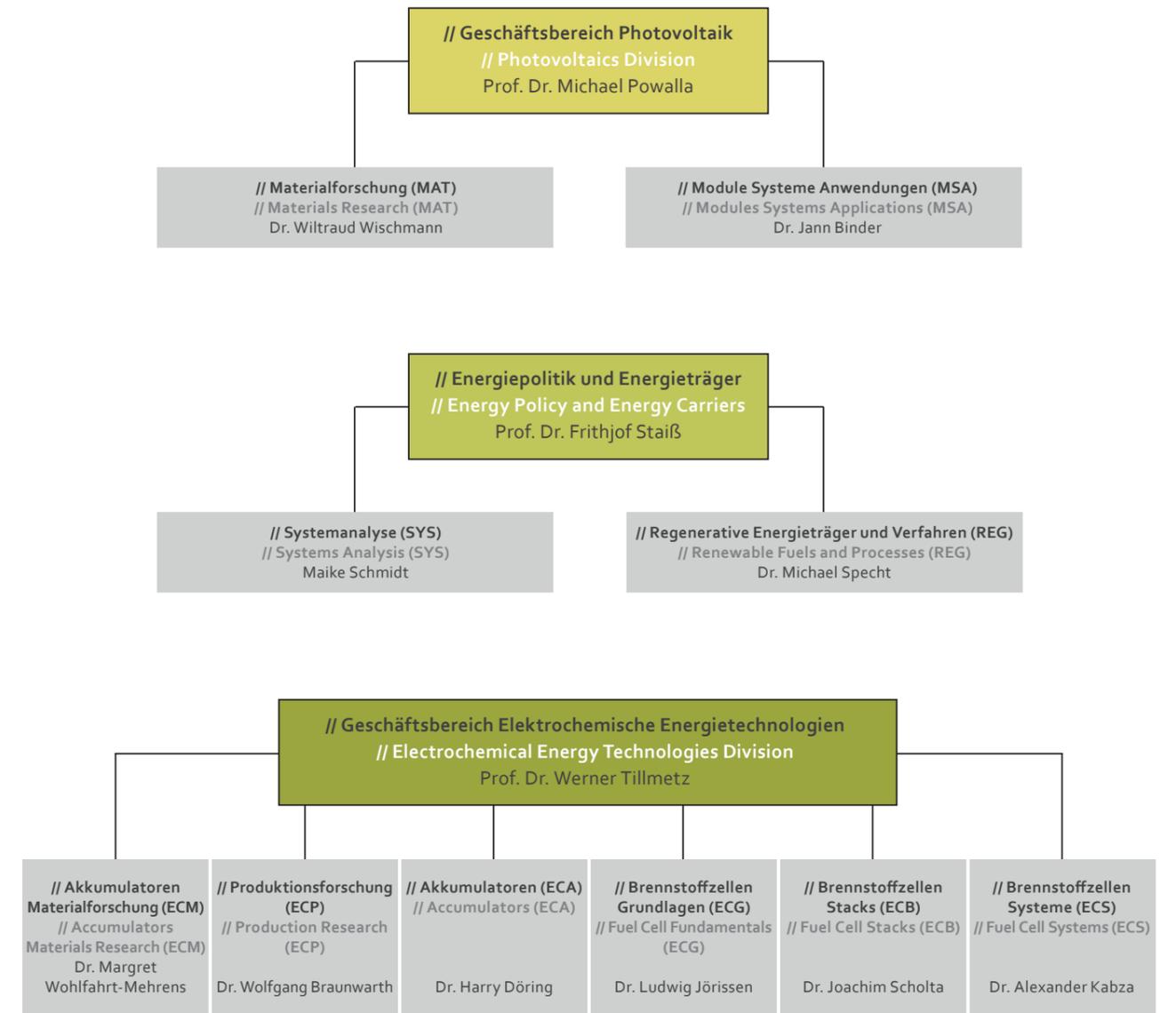
# // Organigramme

## 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 (0) 711 78 70-278  
E-mail: [claudia.brusdeylins@zsw-bw.de](mailto:claudia.brusdeylins@zsw-bw.de)

// Widderstall



Widderstall 14  
89188 Merklingen

// Ulm



Helmholtzstraße 8  
89081 Ulm

**Ansprechpartner / Contact**  
Tiziana Bosa  
Phone: +49 (0) 731 95 30-601  
E-mail: [tiziana.bosa@zsw-bw.de](mailto:tiziana.bosa@zsw-bw.de)

// Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24  
89081 Ulm

# // Abkürzungen

## Abbreviations

### // Firmen, Institute, Institutionen

#### // Companies, Institutes, Institutions

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe / German Federal Institute for Geosciences and Natural Resources
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
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e. V.
BW	Baden-Württemberg
CAM	Center of Automotive Management
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEP	Clean Energy Partnership
CIC	Centro de Investigación Cooperativa (Cooperative Research Centre) energiGUNE
CIDETEC	Centro de Investigación Tecnológica en Electroquímica
COP	Conference of Parties
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.
ECS	Electrochemical Society
EIGSI	Ecole d'Ingénieurs Généralistes
eLaB	ZSW Labor für Batterietechnologie
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
FCH-JU	Fuel cells and Hydrogen – Joint Undertaking
FKF-MPI	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung
FNR	Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe
FPL	Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen / Research platform for industrial production of lithium-ion cells
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
FZJ	Forschungszentrum Jülich GmbH
GPM	Groupe de Physique des Matériaux
HIU	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
HS	Hochschule
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
ICMAB	Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHK	Industrie- und Handelskammer
IMEC	Interuniversity Microelectronics Center
INL	International Iberian Nanotechnology Laboratory
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISI	Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
IZES	Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH
KIT	Karlsruher Institut für Technologie / Karlsruhe Institute of Technology
MCT	Manz CIGS Technology GmbH
NEDO	New Energy and Industrial Technology Development Organization
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
RSC	Royal Society of Chemistry
SAE	Society of Automotive Engineers
SINTEF	Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning ved NTH
SWU	Stadtwerke Ulm/Neu Ulm
TDK	TDK Corporation Technical Center
TU	Technische Universität
UECT	Ulmer ElektroChemische Tage – Ulm ElectroChemical Talks
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH
unw	Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e. V.

WBZU	Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e. V.
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süd
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH

### // Technische Begriffe

#### // Technical Terms

AC	Alternating Current / Wechselstrom
AEL	Alkalische Druckelektrolyse / Alkaline Pressure Electrolysis
ARC	Accelerated Rate Calorimeter
AZO	Aluminium-dotiertes ZnO / Aluminium-doped ZnO
BMS	Batteriemanagementsystem / Battery Management System
CCM	Catalyst Coated Membrane
CdS	Cadmiumsulfid / Cadmium Sulfide
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHP	Combined Heat and Power
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CNN	Convolutional Neural Network
CT	Computer-Tomographie
DC	Direct Current / Gleichstrom
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell / Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
DNN	Deep Neural Networks / Tiefe Neuronal Netze
DOD	Depth of Discharge
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz / Renewable Energy Act
EQE	External Quantum Efficiency
eV	Elektronenvolt / Electronvolt
GD	Glow Discharge / Glimmentladung
GDL	Gas Diffusion Layer / Gasverteilerschicht
GDOES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy / Optische Glimmentladungsspektroskopie
HRS	Hydrogen Refueling Station / Wassertoff-Tankstelle
IR	Infrarot / infrared
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MEA	Membrane Electrode Assembly / Membran-Elektroden-Einheit
MPL	Micro Porous Layer / Mikroporöse Schicht
MT	Mitteltemperatur / Medium Temperature
μ-CT	Mikro-Computertomografie / Micro-Computed Tomography
P <sub>2</sub> G®	Power-to-Gas
P <sub>2</sub> L	Power-to-Liquid
PEM	Polymerelektrolytmembran / Polymer Electrolyte Membrane
PEMFC	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle / Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
PFSa	Perfluorosulfonic Acid
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PID	Potenzialinduzierte Degradation / Potential Induced Degradation
PtG	Power-to-Gas
PV	Photovoltaik / Photovoltaics
REM	Rasterelektronenmikroskop
RES	Renewable Energy Sources
RMSE	Root Mean Square Error / mittlerer quadratischer Fehler
SEI	Solid Electrolyte Interface
SEM	Scanning Electron Microscope
SIL	Safety Integrity Level / Sicherheitsintegritätslevel
SIMS	Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie / Secondary Ion Mass Spectrometry
SNG	Substitute Natural Gas / Erdgassubstitut
SOC	State of Charge / Ladungszustand
SOH	State of Health
TEM	Transmission Electron Microscopy / Transmissionselektronenmikroskopie
ZMO	Zinkmagnesiumoxid ((Zn,Mg)O) / Zinc Magnesium Oxide ((Zn,Mg)O)

// Mitgliedschaften  
// ZSW is a member of



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

// Impressum  
// Imprint

// Herausgeber Publisher  
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)  
  
Meitnerstraße 1  
70563 Stuttgart  
Phone: +49 (0)711 78 70-0  
Fax: +49 (0)711 78 70-100  
  
E-mail: [info@zsw-bw.de](mailto:info@zsw-bw.de)  
Internet: [www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)

// Layout & Satz Layout & Setting  
Sieber & Wolf Werbeagentur  
Hofgut Mauer 1  
70825 Korntal-Münchingen  
[www.sieberundwolf.de](http://www.sieberundwolf.de)

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

// Redaktion Editors  
Tiziana Bosa  
Claudia Brusdeylins  
Alexander Del Regno  
Gudrun Scherg  
Ulrike Zimmer

---

**Stuttgart**

Meitnerstraße 1  
70563 Stuttgart  
Germany  
Phone: +49 (0) 711 78 70-0  
Fax: +49 (0) 711 78 70-100

**Solar-Testfeld Widderstall**

Widderstall 14  
89188 Merklingen  
Germany  
Phone: +49 (0) 7337 92 394-0  
Fax: +49 (0) 7337 92 394-20

**Ulm**

Helmholtzstraße 8  
89081 Ulm  
Germany  
Phone: +49 (0) 731 95 30-0  
Fax: +49 (0) 731 95 30-666

**Ulm eLaB**

Lise-Meitner-Straße 24  
89081 Ulm  
Germany  
Phone: +49 (0) 731 95 30-500  
Fax: +49 (0) 731 95 30-599

[www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg  
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2008