

// ERGEBNISSE  
RESULTS

2015

# // Inhalt

## Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / The Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	<b>Erfolge 2015 / Achievements 2015</b>
16	<b>Schwerpunktbericht / Focus Report</b> Energie als System betrachtet Energy considered as a system
32	<b>Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects</b>
34	Systemanalyse / Systems Analysis
38	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
42	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
46	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
50	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
54	Produktionsforschung / Production Research
56	Akkumulatoren / Accumulators
60	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
64	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
68	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
70	<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 Foreword

Mit dem Abkommen der Weltklimakonferenz in Paris haben 195 Staaten beschlossen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C und möglichst unter 1,5 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Dazu muss die Schrittgeschwindigkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen deutlich erhöht werden. Das gilt auch für Deutschland. Die Energiewende verlief in einigen Bereichen zwar sehr positiv und hat u. a. dazu geführt, dass bereits heute jede dritte Kilowattstunde Strom regenerativ erzeugt wird. In anderen Bereichen wie dem Verkehr, der nach wie vor nahezu vollständig auf fossilen Energieträgern basiert, bleibt die Entwicklung allerdings deutlich hinter den gesteckten Zielen zurück.

Die Energiewende sollte deshalb stärker als bisher als integriertes Gesamtsystem gedacht werden. Strom-, Wärme- und Mobilitätssysteme sind intelligent zu koppeln, damit die geeignetste Energieform jeweils am richtigen Ort und zur richtigen Zeit zuverlässig, kosteneffizient und klimaverträglich zur Verfügung steht. Das Thema Sektorkopplung bildet den Schwerpunkt unseres Jahresberichts 2015. Der Bericht präsentiert darüber hinaus weitere wissenschaftliche Highlights aus unseren Themenfeldern. Dazu zählen Dünnschicht-Solarzellen mit höchster Effizienz, die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen für Fahrzeuge im Minutentakt oder erfolgreiche Dauertests von Brennstoffzellen der 100-kW-Klasse mit äquivalenten Fahrleistungen von 5.600 km pro Woche.

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 Förderung 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!

With the agreement reached at the UN Climate Change Conference in Paris, 195 countries resolved to limit global warming to well below 2°C and preferably to under 1.5°C versus the pre-industrial period. To do so, the pace of the reduction in greenhouse gas emissions must be markedly increased. This also applies to Germany. In some fields the energy turnaround has proceeded extremely positively indeed, and one of the results is that today every third kilowatt hour of electricity is generated using a renewable energy source. However, progress in other sectors has lagged considerably behind the objectives, for example, in the transport sector, which continues to be almost entirely based on fossil fuels.

Therefore, more than has previously been the case, the energy turnaround should be thought of as an integrated whole system. Electricity, heating and mobility systems are to be linked intelligently so that the most suitable form of energy is always reliably and cost-effectively available at the right place and at the right time in an environmentally compatible manner. Sector coupling is the focus of our 2015 Annual Report. Furthermore, the Report presents further scientific highlights from our range of topics, including thin-film solar cells with highest efficiencies, the production of lithium-ion cells for vehicles at minute intervals and successful endurance tests on fuel cells in the 100 kW class with the equivalent weekly mileage of 5,600 kilometres.

We are pleased with the continuing great interest in our work, which we experience in many discussions and the 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 The Mission of 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.

### // Energy is our future

Energy is crucial for prosperity and development. It drives innovation and is itself the subject of innovation. Our research and development covers photovoltaics, renewable energy sources (such as hydrogen and methane gas as a natural gas substitute), 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 discipline.

### // 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

Thanks to our knowledge of all the complex elements that must be combined to provide a sustainable future, we are able to deliver transparent, neutral information to the economic, political and social arenas. This provides the tools to those industries and institutions responsible for our future to make decisions based on the best unbiased information.



## // 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. Karl Joachim Ebeling
- > Prof. Dr. Uli Lemmer

### Ministerien und Organisationen / Ministries and Organizations

- > Ministerialrätin Susanne Ahmed, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Karl Greißing, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft, Baden-Württemberg
- > Regierungsdirektor Christoph Rövekamp, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- > Dr.-Ing. Klaus Bonhoff, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

### Universitäten / Universities

- > Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling, Präsident der Universität Ulm
- > Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel, Rektor der Universität Stuttgart

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

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

### Fraunhofer-Gesellschaft

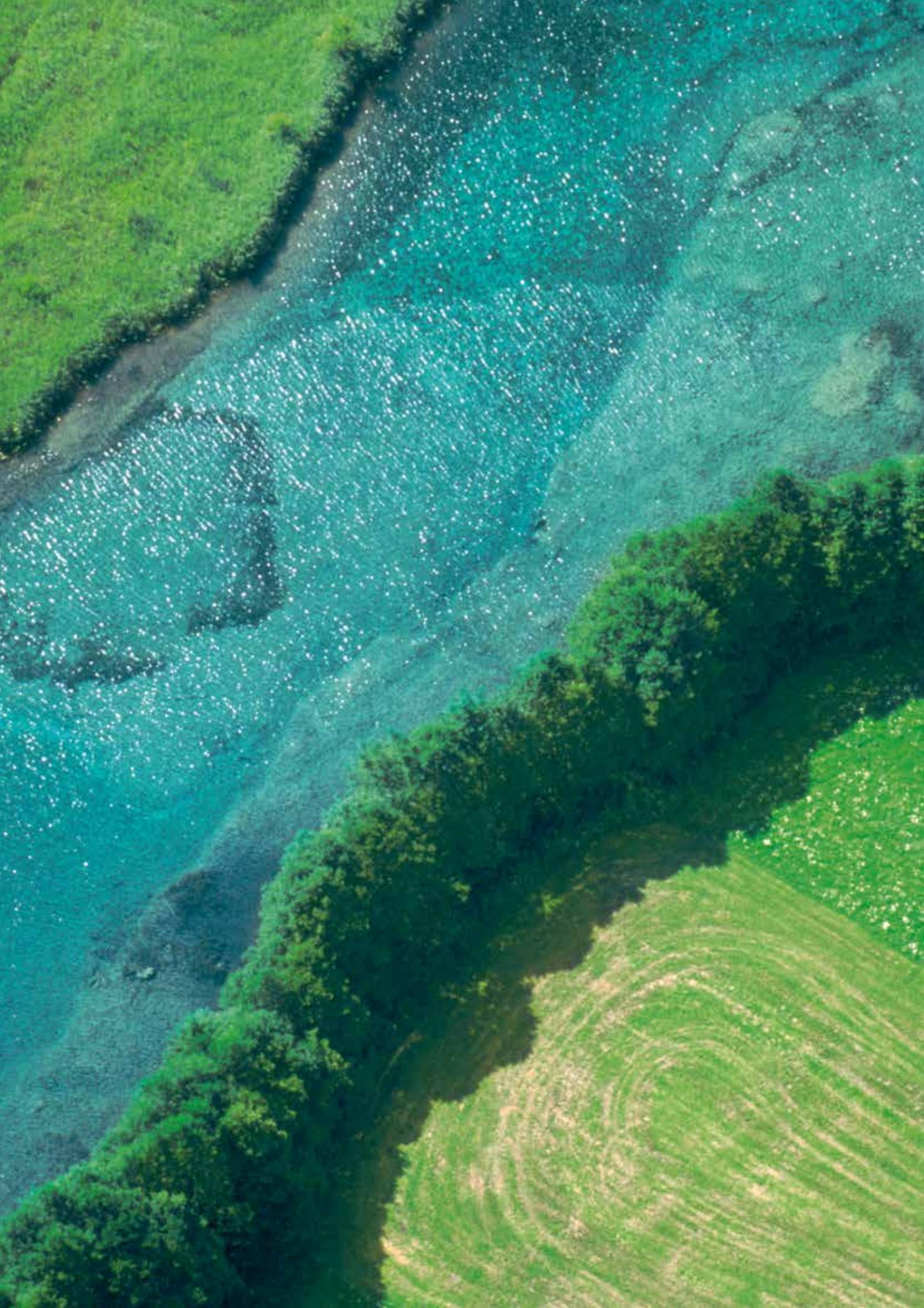
- > Prof. Dr. Eicke Weber, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

### Wissenschaft / Science

- > Prof. Dr. Michael Auer, Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung
- > Prof. Dr. Achim Bubbenzer, Rektor der Hochschule Ulm
- > Prof. Dr. habil. Ursula Eicker, Hochschule für Technik Stuttgart
- > Prof. Dr. Angelika Heinzel, Universität Duisburg-Essen
- > Prof. Dr. Uli Lemmer, Karlsruher Institut für Technologie
- > Prof. Dr. Uwe Leprich, Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH
- > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

### Wirtschaft / Commercial enterprises

- > Mathias Berz, Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm
- > Dr. Winfried Hoffmann, Applied Solar Expertise
- > Dr. Jürgen Kirschner, Robert Bosch GmbH
- > 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 2015  
Achievements 2015

## // Erfolge 2015 Achievements 2015

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen und damit zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu kommen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch die Entwicklung neuer und verbesserter Energietechnologien und ihren Transfer in den Markt.

So wurden auch 2015 wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

“Energy with a future” describes the goal of increasing the share of renewable energy sources to ensure a sustainable energy supply. ZSW is pursuing this goal by developing new and improved energy technologies and ensuring their transfer to the market.

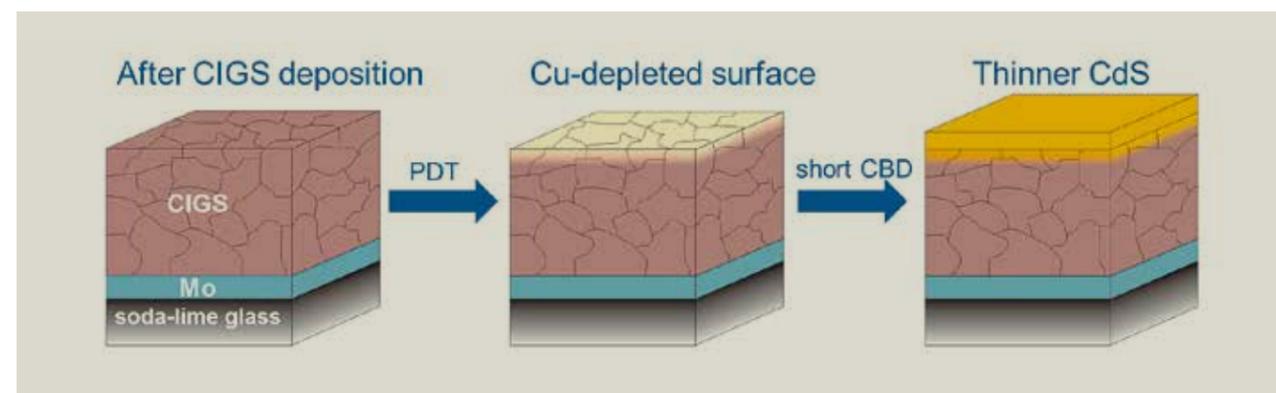
In 2015, excellent results were achieved once again in the key areas.

### // CIGS-Dünnschicht-Solarzellen mit höchsten Effizienzen

2014 hatten die Dünnschicht-Experten des ZSW die CIGS-Weltrekordzelle mit einem Wirkungsgrad von 21,7 % präsentiert. Insgesamt wurden 2014 und 2015 mehr als 220 Zellen mit Wirkungsgraden von über 21,0 % hergestellt. Diese hohe Zahl bestätigt die Reproduzierbarkeit der entwickelten Prozesse und beweist zudem, dass sie ausreichend robust sind, um eine industrielle Umsetzung zu ermöglichen. Die aktuellen Entwicklungen wurden durch eine weitere Verbesserung des Alkali-Post-Deposition-Treatments (Alkali-PDT) ermöglicht, das die CIGS-Oberfläche vorteilhaft modifiziert. Sie reduziert die Rekombination der generierten Ladungsträger, was wiederum die Leerlaufspannung positiv beeinflusst. Ein verbessertes Keimwachstum ermöglicht dünnere Pufferschichten und eine damit verbundene Verminderung der Absorptionsverluste. Im Februar 2015 legte das ZSW auch für kadmiumfreie CIGS-Solarzellen mit Zn(O,S)-Pufferschicht einen Weltrekord von 21,0 % vor. Auch mit alternativer Pufferschicht sind also höchste Effizienzen erreichbar, was einmal mehr das hohe Potenzial der CIGS-Technologie unter Beweis stellt.

### // CIGS thin film solar cells with highest efficiencies

In 2014, the thin film experts at ZSW presented the CIGS world record holding cell with an efficiency of 21.7%. In total, more than 220 cells with efficiencies of over 21.0% were produced in 2014 and 2015. This high number confirms the reproducibility of the processes developed and also proved that they are robust enough to facilitate industrial implementation. The current developments have been made possible by further improvement of the Alkali Post Deposition Treatment (Alkali PDT), which improves the CIGS surface. It reduces recombination of the charge carriers generated, which in turn has a positive effect on open-circuit voltage. Improved bacterial growth allows thinner buffer layers, thus also reducing absorption losses. In February 2015, ZSW also presented a world record of 21.0% for cadmium-free solar cells with Zn(O,S) buffer layers. High efficiencies can even be reached with alternative buffer layers, which once again proves the high potential of CIGS technology.



// Schematische Darstellung des Alkali-PDT-Prozesses und seine Auswirkungen auf die CIGS-Oberfläche.  
// Schematic diagram of the Alkali PDT process and its effects on the CIGS surface.



// Projektleiter Rainer Stern mit ersten PHEV-1-Zellen von der FPL.  
// Project manager Rainer Stern with first PHEV-1 cells from FPL.

Foto: ZSW/ Photodesign Buhl

### // Automobiltaugliche Lithium-Ionen-Batterien industriell hergestellt

Die Produktion von einer Zelle pro Minute mit serientauglichen Prozessen war eines der Ziele des Projektes „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“. Anfang 2015, nur vier Monate nach Inbetriebnahme, konnten im Rahmen des ersten Industrieprojektes die Prozessschritte qualifiziert und der Referenzprozess definiert werden. Seither wurden mehrere hundert Kilogramm Aktivmaterial verarbeitet, viele Kilometer Elektrodenband produziert und mehr als tausend Elektrodenwickel (Jelly Rolls) hergestellt. Die Kapazität der ZSW-PHEV-1-Zellen liegt mit 22 Ah auf dem Niveau kommerzieller Zellen aus Asien. Diese Erfahrung dient kommenden Projekten mit der Industrie, beispielsweise bei der Adaption der Prozesse auf fortschrittliche (sog. „Generation 3“-) Materialien und bei der weiteren Optimierung der Herstellprozesse.

### // Industrial production of lithium-ion batteries suitable for automotive applications

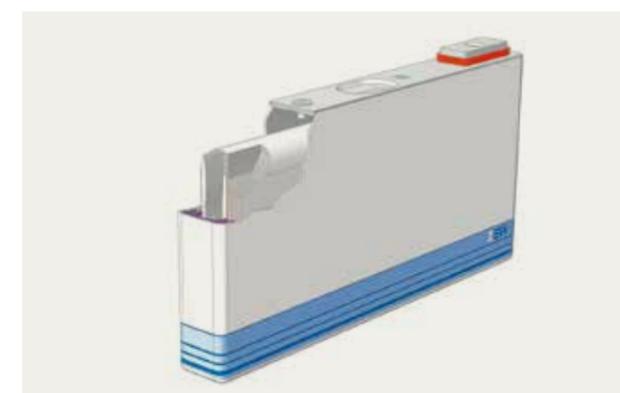
Producing one cell per minute using volume-ready processes was one of the goals of the “Research platform for the industrial production of lithium ion cells (FPL)” project. In early 2015, just four months after commissioning, the process steps were qualified, and the reference process was defined as part of the first industrial project. Since then, several hundred kilos of active material have been processed, many kilometres of electrode band have been produced and over one thousand electrode coils (jelly rolls) have been manufactured. The capacity of the ZSW PHEV-1 cells is equal to that of commercial cells from Asia, at 22 Ah. This experience will serve upcoming projects with the industry, for example in adapting processes to advanced (“third generation”) materials and further optimisation of the manufacturing processes.

### // Kobaltfreie Lithium-Ionen-Batterien für Elektroautos

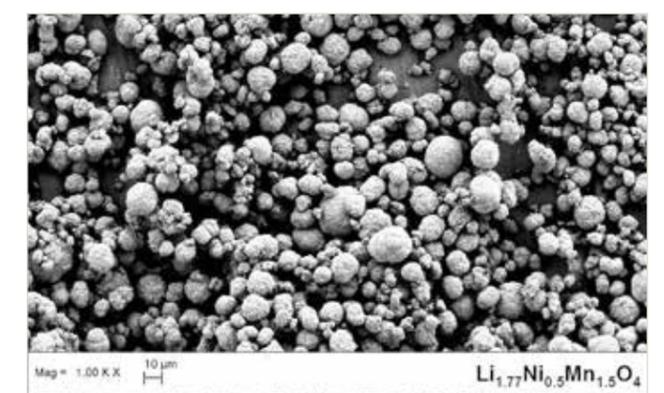
Den Ulmer Materialforschern ist es gelungen, ein kobaltfreies Kathodenmaterial für Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterien zu entwickeln. Das Lithium-Nickel-Manganoxid benötigt kein teures begrenztes Kobalt und nutzt weniger Nickel. Mit mehr als 210 mAh/g besitzt es eine größere Speicherkapazität als heute verwendete oder in der Entwicklung befindliche Kathodenmaterialien. Da die Entladespannung bei über 4,5 V liegt, ist auch eine bis zu 40 % höhere Energiedichte möglich. Batterien mit einer derart verbesserten Energiedichte könnten die Reichweite von Elektrofahrzeugen signifikant verlängern. Das Manganoxid enthält sphärische Partikel mit einer hohen Klopfdichte von 2,4 g/cm<sup>3</sup> und lässt sich einfach über bekannte Verfahren herstellen. Erste Muster im Kilogrammmaßstab mit hoher Qualität wurden im ZSW bereits hergestellt.

### // Cobalt-free lithium-ion batteries for electric vehicles

The material researchers from Ulm succeeded in developing a cobalt-free cathode material for high-energy lithium-ion batteries. The lithium-nickel manganese oxide does not require expensive and scarce cobalt and uses less nickel. With over 210 mAh/g, it has a greater storage capacity than cathode materials in use or in development today. As the discharge voltage is over 4.5 V, an energy density of up to 40% higher can be achieved. Batteries with energy densities improved to this extent could significantly increase the range of electric vehicles. Manganese oxide contains spherical particles with a high tap density of 2.4 g/cm<sup>3</sup> and is easy to produce using known methods. ZSW has already produced initial, high quality samples at a kilogram scale.



// CAD-Zeichnung der ersten PHEV-1-Zelle von der FPL.  
// CAD drawing of the PHEV-1 cell from FPL.



// REM-Aufnahme der Pulverpartikel des kobaltfreien Kathodenmaterials  $\text{Li}_{1.77}\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ .  
// SEM image of powder particles of the cobalt-free cathode material  $\text{Li}_{1.77}\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ .

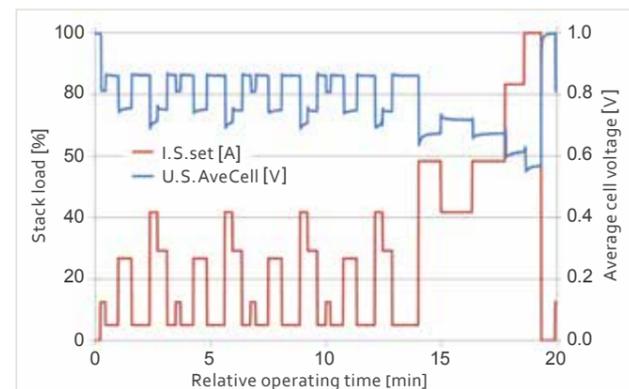
## // Erfolge 2015 Achievements 2015

### // 100-kW-Hochleistungsbrennstoffzelle im Dauertest

Mit der Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen steigt der Bedarf an Tests für Hochleistungsbrennstoffzellen weltweit und die Nachfrage nach unabhängigen Testinstitutionen. Im Fokus steht das elektrische Verhalten der Brennstoffzelle unter dynamischen Belastungszuständen, wie sie im täglichen Fahrzyklus auftreten. Das Ulmer Testzentrum des ZSW verfügt über eine herausragende Infrastruktur, um diese Tests durchzuführen. So wurde eine fahrzeugaugliche 100-kW-Brennstoffzelle mit einer wöchentlichen Fahrleistung von über 5.600 km betrieben. Der Dauertest erfolgte in einem harmonisierten, dynamischen Prüfzyklus und lieferte wichtige Informationen über die Leistung und das Alterungsverhalten des Brennstoffstapels. Er belegt zudem die extreme Leistungsfähigkeit des Testzentrums.

### // Prognose der Erholung von PID-geschädigten PV-Modulen

Potenzialinduzierte Degradation (PID) von Photovoltaik(PV)-Modulen führt an einigen PV-Anlagen innerhalb der ersten Betriebsjahre immer noch zu spürbaren Ertragsseinbußen. Bei den ersten Anzeichen sollten unverzüglich Sanierungsmaßnahmen eingeleitet werden, bei denen die Potenzialverhältnisse zwischen PV-Modul und Erde beeinflusst werden. Je nach Maßnahme wird dann mit einer mehr oder weniger schnellen und deutlichen Regeneration der PV-Module gerechnet; eine wirkliche Prognose der Erholung war bisher aber nicht möglich. Am ZSW wurden nun die Regenerationsprozesse quantifiziert und modellhaft beschrieben. Damit ist es jetzt möglich, nach vorheriger Laborcharakterisierung des eingesetzten Modultyps und bei Kenntnis der im Feld erwarteten Temperaturen die Leistungserholung vorherzusagen. Die Abbildung unten rechts zeigt die prognostizierte sowie die im Feld beobachtete Erholung (hier am Parameter Füllfaktor) eines PID-geschädigten kristallinen Silizium(c-Si)-Moduls über mehrere Monate.



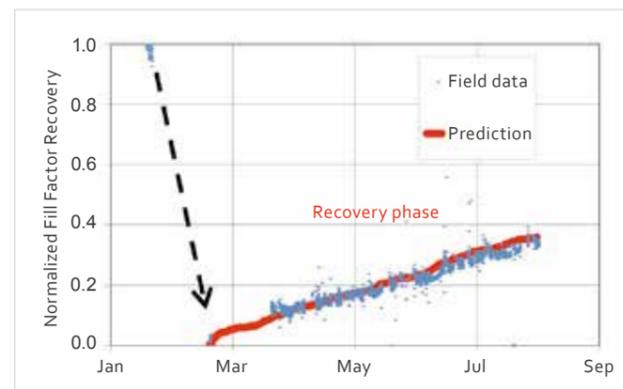
// Lebensdauer-Untersuchung einer Brennstoffzelle anhand des harmonisierten Prüfzyklus FC-DLC („Fuel Cell Dynamic Load Cycle“).  
// Lifetime test based of a fuel cell stack on the harmonised test cycle FC-DLC (“Fuel Cell Dynamic Load Cycle”).

### // 100 kilowatt high-performance fuel cell in endurance test

As fuel cell vehicles are launched on the market, the demand for tests of high-performance fuel cells is rising worldwide, as is the need for independent test institutions. The focus is on the electrical properties of fuel cells under dynamic load conditions such as those which occur in daily driving cycles. ZSW's test centre in Ulm has an outstanding infrastructure for performing these tests. For example, a vehicle-ready 100 kilowatt fuel cell was run with a weekly mileage of over 5,600 kilometres. The endurance test was made in a harmonised, dynamic test cycle and provided important information on the performance and ageing properties of the fuel cell stack. It also proved the test centre's extremely high performance.

### // Forecast for recovery of PV modules after PID damage

Potential-Induced Degradation (PID) of photovoltaic (PV) modules still causes substantial yield losses within the first years of operation of some PV systems. Refurbishment measures to influence the potential conditions between the PV module and earth should be initiated immediately when symptoms are first noticed. Depending on the measure, regeneration of the PV modules can be expected to be more or less fast and clear. However, a real forecast of the recovery was impossible until now. ZSW has now quantified the regeneration processes and described them in models. This means it is now possible to predict the performance recovery after prior laboratory characterisation of the module type used and knowing the temperatures expected in the field. The figure below right shows the forecast recovery and that observed in the field (based on the fill factor parameter) of a crystalline silicon (c-Si) module with PID damage over several months.



// Thermische Erholung des Füllfaktors (normiert) eines c-Si-Moduls im Freifeld nach PID-Schädigung: gemessener Verlauf (blau) und Prognose (rot).  
// Thermal recovery of the fill factor (standardised) of a c-Si module in the field after PID damage: measured curve (blue) and forecast (red).



// Fast 500 Brennstoffzellen-Heizgeräte wurden im Rahmen von Callux installiert und getestet.  
// Almost 500 fuel cell heaters were installed and tested as part of Callux.

Foto: Callux/EnBW

### // Callux-Projekt endet mit Markteinführung

Mit der Markteinführung von Brennstoffzellen-Heizgeräten wurde der Praxistest „Callux – Brennstoffzellen fürs Eigenheim“, erfolgreich abgeschlossen. Seit Projektbeginn im September 2008 hatten die beteiligten Gerätehersteller und Energieversorger deutschlandweit fast 500 Geräte installiert und betrieben. Das ZSW koordinierte das Leuchtturmprojekt und war für die wissenschaftliche Begleitung sowie das Technologie-Monitoring verantwortlich.

Im Verlauf von Callux konnte die Effizienz und Verfügbarkeit der Geräte stetig optimiert werden. In insgesamt mehr als fünf Millionen Betriebsstunden wurde den Anlagen die für die Markteinführung notwendige Langlebigkeit attestiert und ihre Eignung für einen zukünftigen Einsatz in virtuellen Kraftwerken nachgewiesen. Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen lagen durchschnittlich bei 1,2 Tonnen jährlich im Vergleich zur Wärmebehandlung aus Erdgas-Brennwertgeräten und dem Strombezug aus dem Netz.

### // Callux project ends with market launch

The Callux Domestic Fuel Cell field test was successfully completed with the market launch of fuel cell heaters. Since the project started in 2008, the device manufacturers and power supply companies involved had installed and operated almost 500 units. ZSW coordinated the flagship project and was responsible for scientific supervision and technology monitoring.

The efficiency and availability of the units were increased constantly throughout the Callux project. In a total of over five million operating hours, the systems demonstrated the durability required for market launch and their suitability for future use in virtual power plants. The reduction in CO<sub>2</sub> emissions reached 1.2 tonnes on average compared with heat treatment from condensing natural gas boilers and electricity sourced from the grid.



// Dr. Marc-Simon Löffler (ZSW) erläuterte in Berlin die Herausforderungen bei der Projektkoordinierung.  
// Dr Marc-Simon Löffler (ZSW) explained in Berlin the challenges in project coordination.



// Die Geräte konnten während der Veranstaltung begutachtet werden.  
// The units were available for inspection during the event.



## // Neues Institutsgebäude des ZSW nimmt Gestalt an

The new ZSW institute building is taking shape



// ZSW-Mitarbeiter am 19. Mai 2015 beim Spatenstich im kleinen Kreis.  
// ZSW employees at the groundbreaking ceremony on 19 May 2015.



// Rundgang durch den Neubau mit Finanz- und Wirtschaftsminister Dr. Schmid und ZSW-Vorstand Prof. Staiß beim Richtfest.  
// Tour of the new building with the Minister for Finance and Economics Dr. Schmid, and ZSW's Executive Chairman Prof. Frithjof Staiß at the topping out ceremony.

Weil das ZSW am Standort Stuttgart mit der Ausbaufähigkeit der bislang angemieteten Flächen an Grenzen stieß, wurde ein Neubau im Gebiet des Stuttgarter Engineering Parks (STEP) in Stuttgart-Vaihingen mit Unterstützung der Landeshauptstadt Stuttgart und des Landes Baden-Württemberg geplant. Nach der Baufreigabe im Oktober 2014 wurde unmittelbar mit den Bauarbeiten begonnen; im Jahr 2015 erfolgten die Bohrungen für eine geothermische Energieversorgung sowie die Erstellung des Rohbaus.

### // Energieeffizienz und erneuerbare Energien

Das Energiekonzept des Neubaus mit seiner Nutzfläche von rund 8.000 m<sup>2</sup> umfasst eine Photovoltaik-Fassade mit integrierten CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen, eine Photovoltaik-Anlage auf dem Dach sowie die Wärmeversorgung durch eine Geothermieanlage mit Erdsonden und Wärmepumpe, mit der etwa 50 % der Wärmeenergie regenerativ erzeugt werden.

### // Richtfest

Beim Richtfest am 28. Januar 2016 verwiesen der stellvertretende Ministerpräsident und Finanz- und Wirtschaftsminister Dr. Nils Schmid und der Erste Bürgermeister der Landeshauptstadt Stuttgart Michael Föll auf die hervorragende Zusammenarbeit der Beteiligten für diesen wichtigen Meilenstein der Institutsgeschichte. Werner Frosch vom Architekturbüro Henning Larsen beschrieb den Anspruch des Gebäudeentwurfs, den Anforderungen des ZSW hinsichtlich Flexibilität und der für eine erfolgreiche Forschung und Entwicklung essenziellen Kommunikation gerecht zu werden. In diesem Konzept ermöglichen die Gebäudeteile durch ihre ineinandergreifende Bauweise vielfältige Sichtbeziehungen und räumliche Überlagerungen. Nachdem Zimmerermeister Roland Hödl vom Bauunternehmen C. Dupré den traditionellen Richtspruch gehalten hatte, nahmen Gäste und Mitarbeiter im zukünftigen IT-Bereich des Instituts den Richtschmaus ein.

### // Umzug im Herbst 2016

Für 2016 sind der Fassaden- und der Innenausbau vorgesehen, so dass das Institut bereits im Herbst in den Neubau einziehen kann.

Since ZSW was hitting the limits of expandability at the leased premises in Stuttgart, a new building was planned in the area of the Stuttgart Engineering Park (STEP) in Stuttgart-Vaihingen with support of the state capital Stuttgart and the Federal State of Baden-Württemberg. After the construction approval was issued in October 2014, work started immediately and the boreholes for the geothermal energy supply and the building shell were completed in 2015.

### // Energy efficiency and renewable energy

The energy concept of the new building with its floor space of around 8,000 m<sup>2</sup> includes a photovoltaic façade with integrated CIGS thin-film solar modules, a photovoltaic system on the roof and a geothermal heating system with geothermal probes and a heat pump, with which about 50% of the heat energy is generated using a renewable energy source.

### // Topping out

At the topping out ceremony on 28 January 2016, the Deputy Minister-President and Minister for Finance and Economics, Dr. Nils Schmid and Michael Föll, the first mayor of the state capital Stuttgart, pointed to the excellent cooperation between the involved parties for this important milestone of the institute's history. Werner Frosch from the architectural firm Henning Larsen described the claim of the building's design to meet the requirements of ZSW in terms of flexibility and the communication essential for successful research and development. In this concept, the intertwined elements of the building allow for diverse view axes and spatial overlays. After master carpenter Roland Hödl from the building company C. Dupré had held the topping out speech, the guests and employees gathered in the future IT section of the building to enjoy the traditional topping out meal.

### // Relocation in autumn 2016

The façade and interior work should be finished in 2016, so that the institute can move into the new building in the autumn.



// Stand der Gründungsarbeiten am 17. April 2015.  
// Progress of the foundation work on 17 April 2015.



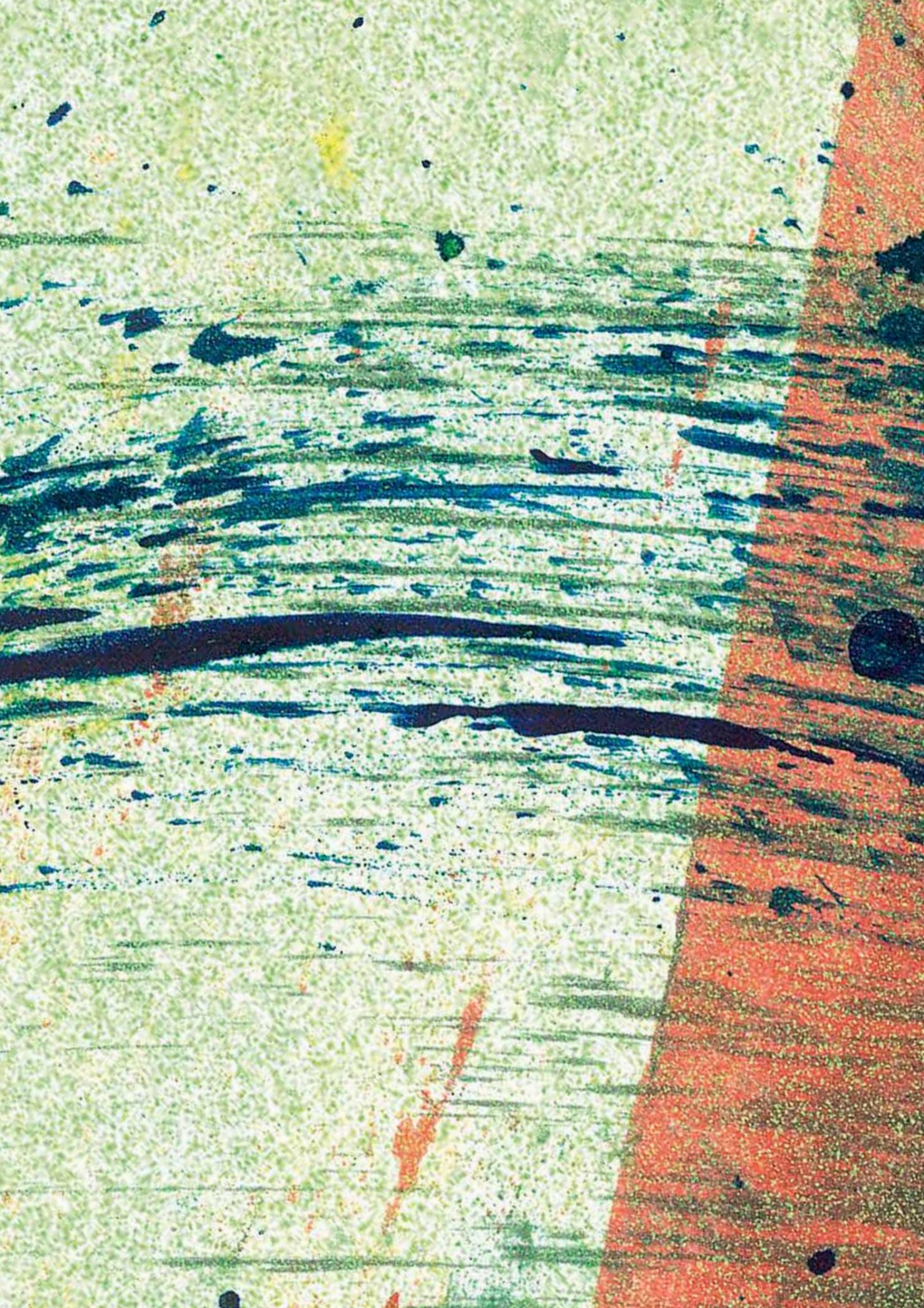
// Maurerarbeiten Ende Juni 2015.  
// Masonry work at the end of June 2015.



// Blick in einen der Laborräume am 28. Juli 2015.  
// Sneaking a peak into one of the laboratories on 28 July 2015.



// Zimmerermeister Hödl beim Richtspruch am 28. Januar 2016.  
// Master carpenter Roland Hödl at the topping out speech on 28 January 2016.



// **Schwerpunktbericht**  
Energie als System betrachtet  
**Focus Report**  
Energy considered as a system



## // Energie als System betrachtet Energy considered as a system



Denn die heutigen Energiewandlungs- und -bereitstellungstechnologien basieren auch in Deutschland noch zu rund 80 % auf dem Einsatz kohlenstoffhaltiger fossiler Brennstoffe. In der Stromerzeugung sind dies vor allem Braunkohle, Steinkohle und Erdgas, in der Wärmebereitstellung dominieren Erdgas und Heizöl, im Mobilitätssektor kommen nahezu ausschließlich die mineralölbasierten Kraftstoffe Benzin und Diesel zum Einsatz. Der erforderliche Transformationsprozess umfasst jedoch weit mehr als die technische Dimension, denn er muss nicht nur ökonomisch tragfähig gestaltet, sondern auch aktiv von der Gesellschaft getragen werden. Um das erforderliche Vertrauen in eine Energieversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien zu schaffen, sind Transparenz und die Bereitstellung fundierter, neutraler und verständlicher Informationen von großer Bedeutung.

Das Fachgebiet Systemanalyse leistet dafür an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Politik bzw. Gesellschaft einen wichtigen Beitrag. So konnte beispielsweise über die Anwendung des im Rahmen des Monitoringprozesses „Energie der Zukunft“ von der Expertenkommission entwickelten Ansatzes der energiewirtschaftlichen Gesamtrechnung das Argument, dass die Energiewende die Volkswirtschaft über Gebühr belastete, faktenbasiert entkräftet werden. Gerade in Baden-Württemberg hat die im Rahmen des Projektes „Monitoring der Energiewende“ aufgebaute breite und transparente Informationsbasis sehr zur Versachlichung der Diskussion beigetragen, sodass nunmehr ein konstruktiver Dialog möglich ist.

Die technologischen Möglichkeiten zur klimaneutralen Stromerzeugung sind vielfältig, die industrielle Umsetzung und die damit verbundene Kostenreduktion in vollem Gange. So entstehen vielversprechende neue Wirtschaftszweige für Energieeffizienztechnologien und dezentral orientierte regenerative Stromerzeugungsanlagen. Es besteht heute kein Zweifel mehr daran, dass mittel- bis langfristig eine vollständige Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien möglich ist. Die tragenden Säulen werden die Windenergie an Land und auf See sowie die Photovoltaik sein, während die Wasserkraft, die Biomasse und die Tiefengeothermie ihrem Potenzial entsprechend flankierende Beiträge liefern werden. Diese sind deshalb nicht gering zu schätzen, weil sie nicht fluktu-

After all, even in Germany about 80% of the current energy conversion and supply technologies are still based on the use of carbon-containing fossil fuels. In the electricity generating sector, these are mainly lignite, hard coal and natural gas. Natural gas and heating oil, on the other hand, dominate in the heating sector, while mineral oil-based petrol and diesel fuels are almost exclusively used in the mobility sector. However, the required transformation process involves far more than the technical aspects, as it must not only be economically viable but also actively supported by society. In order to create the necessary confidence in an energy supply based on renewable energies, transparency and the provision of sound, neutral and comprehensible information are very important.

As an interface between science, policy and society, the Systems Analysis research department provides an important contribution in this regard. For example, based on facts and by using the energy industry-based economic accounting approach developed by the Expert Commission as part of the “Energy of the Future” monitoring process, the argument that the energy transformation burdens the economy through fees has successfully been dispelled. Especially in Baden-Württemberg, the broad and transparent information basis developed in the “Monitoring the energy transition” project has greatly contributed to ensuring a more objective discussion, so that a constructive dialogue is now possible.

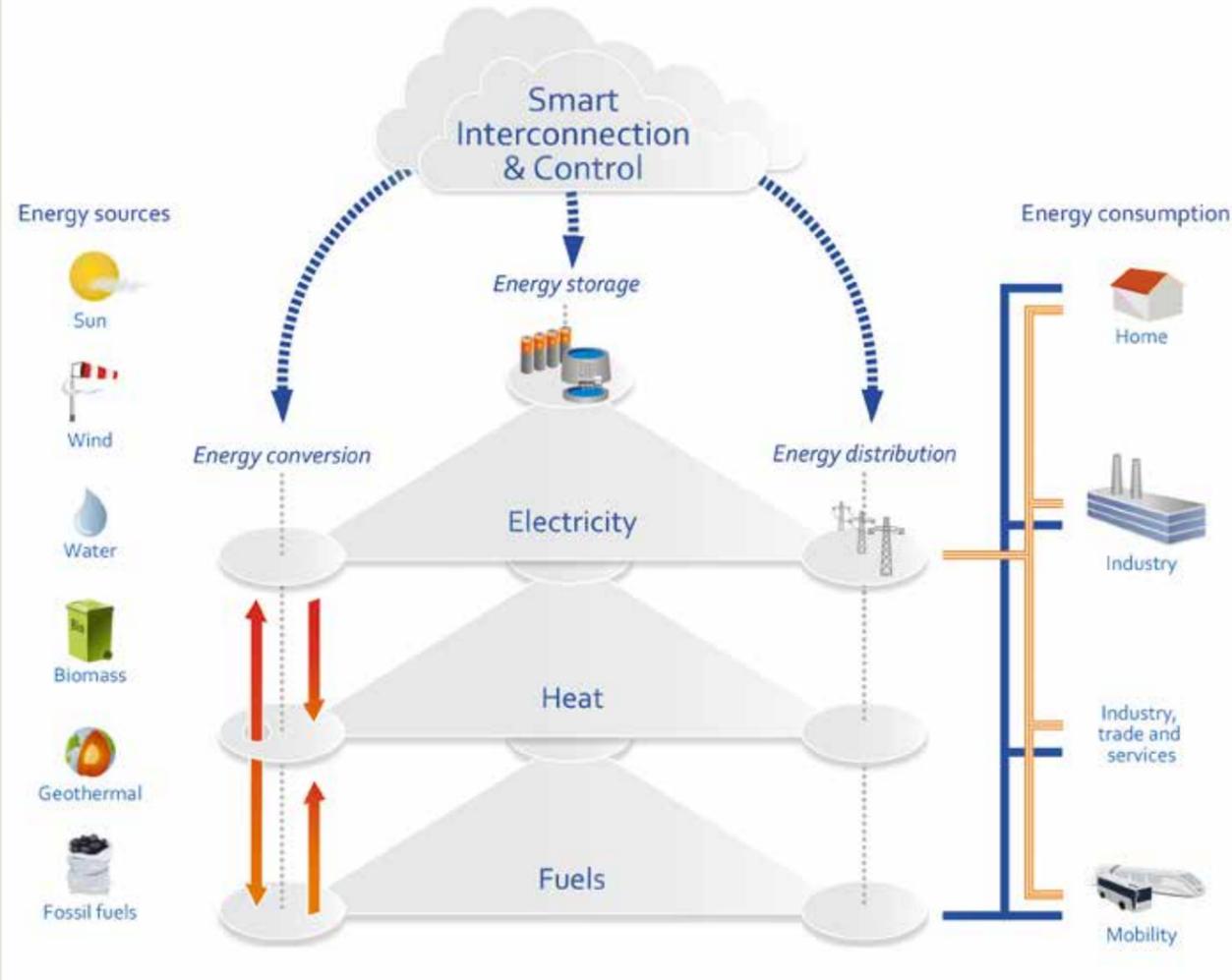
There are diverse technological possibilities for generating climate-neutral electricity, and their industrial implementation and the associated reductions in costs are now well underway. For instance, promising new economic sectors are being created for energy efficient technologies and decentralised renewable electricity generation systems. Today, there is no longer any doubt that an electricity supply completely based on renewable energies is possible in the medium to long term. The cornerstones will be onshore and offshore wind energy together with photovoltaics, while hydropower, biomass and deep geothermal energy will provide supporting roles in accordance with their respective potential. These, however, should not be underestimated, because they do not produce intermittent energy but largely constitute controllable electricity generation technologies.

### // Sektorkopplung – Voraussetzung für Energiewende und Klimaschutz

Kommenden Generationen ähnliche Lebensbedingungen zu hinterlassen, wie sie heutige Generationen vorgefunden haben, ist nur mit konsequentem und effektivem Klimaschutz möglich. Das haben auch die Diskussionen und Beschlüsse auf der Weltklimakonferenz Ende 2015 in Paris bestätigt. Dort gelang es, einen Klimavertrag zu schließen, der die globale Erwärmung auf unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten begrenzen soll, wenn möglich sogar auf 1,5 °C. Nach dieser internationalen Einigung muss auf nationaler Ebene die Umsetzung folgen. Das ist nur über einen systematischen Umstieg auf erneuerbare Energien möglich, womit wiederum vielfältige Transformationsprozesse verbunden sind.

### // Sector coupling – a prerequisite for the energy transition and climate protection

It will only be possible to leave future generations with living conditions similar to those found by current generations through providing consistent and effective climate protection. This has been confirmed by the discussions and decisions taken at the World Climate Conference, which was held at the end of 2015 in Paris. There a climate treaty was successfully negotiated that limits global warming to within 2 degrees Celsius of pre-industrial levels and if possible, 1.5 degrees. Now that this international agreement has been reached, its adoption needs to follow at the national level. This is only possible by systematically converting to renewable energies, which in turn incurs diverse transformation processes.



ierend erzeugen, sondern zumindest zum Großteil regelbare Stromerzeugungstechnologien darstellen. Sie bieten somit einen wichtigen Teil der zukünftig erforderlichen Systemflexibilität.

Den heutigen Energiebedarf für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser mit erneuerbaren Energien zu decken, erscheint indes schwierig. Den heutigen Bedarf an chemischen Energieträgern allein aus biomassebasierten Ersatzbrennstoffen zu decken, ist aufgrund von deren beschränkten Potenzialen sogar unmöglich. Der Einsatz von Solarthermie, oberflächennaher und tiefer Geothermie sowie Umweltwärme kann Abhilfe schaffen, verlangt aber neue Lösungen der Wärmeversorgung z. B. mit Nahwärmenetzen. Die Nutzung von Umweltwärme und oberflächennaher Geothermie erfordert den Einsatz von elektrischen Wärmepumpen. Das bedeutet neue Stromanwendungen, die wiederum mit erneuerbarem Strom zu versorgen sind. Auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen können klimaneutral betrieben werden, wenn ihre Brennstoffe entweder biogenen Ursprungs sind oder synthetisch über Elektrolyse und ggf. Methanisierung auf Basis von erneuerbarem Strom erzeugt wurden. Zusammen mit entsprechenden Anstrengungen zur Reduktion des Wärmebedarfs erscheint auch der Wärmebereich klimaneutral darstellbar, sofern eine stärkere Verknüpfung mit dem Stromsektor stattfindet.

Die größte Herausforderung für die Einhaltung der Klimaziele besteht im Mobilitätssektor, der heute nahezu vollständig vom Einsatz fossilbasierter Kraftstoffe abhängt. Ein Ersatz durch

They therefore provide an important part of the system flexibility required in future.

Covering the current energy demand for providing space heating and hot water with renewable energy appears, however, to be more difficult. It is even impossible to meet the current demand for chemical energy carriers using solely biomass-based alternative fuels because of their respective limited potential. The use of solar thermal energy, shallow and deep geothermal energy as well as environmental heat can help, but requires new heating supply solutions, for example with district heating networks. The use of environmental heat and shallow geothermal energy requires the use of electric heat pumps. This means new power applications, which in turn need to be supplied with renewable electricity. Cogeneration plants can also be operated carbon-neutrally if their fuels are either of biogenic origin or are synthetically generated by means of electrolysis and, possibly, methanisation using renewable electricity. Together with corresponding efforts to reduce the heat demand, it therefore seems that the heating sector could also be made more climate neutral provided that a stronger link is made with the electricity sector.

The greatest challenge for meeting the climate targets lies in the mobility sector, which is currently entirely dependent on the use of fossil-based fuels.

## // Focus

biogene Kraftstoffe ist bedingt durch Potenzialgrenzen, auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten, bislang nur zu einem sehr kleinen Teil möglich. Die Elektromobilität – mit batterieelektrischem ebenso wie mit Brennstoffzellenantrieb – bietet eine Alternative. Strombasierte, CO<sub>2</sub>-neutrale Kraftstoffe können als Übergangslösung wie heutige fossilbasierte chemische Energieträger (flüssig und gasförmig) in effizienten Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Hier zeigt sich somit auch für den Mobilitätssektor zukünftig eine enge Verzahnung mit dem Stromsektor.

Bislang wird die Kopplung der Sektoren jedoch ausschließlich als Verwertung möglicher Stromüberschüsse definiert. Dieser Blickwinkel ist angesichts der Anforderungen des Klimaschutzes zu eng, da allein die Kopplung der Sektoren die Chance bietet, das Energiesystem insgesamt regenerativ zu gestalten. Hierzu muss jedoch der Bedarf dieser Sektoren an erneuerbarem Strom sowohl in der direkten Anwendung als auch als Rohstoff für die Produktion strombasierter Bren- und Kraftstoffe berücksichtigt werden.

Die Betrachtung der Energiewelt der Zukunft als Gesamtsystem ermöglicht es, alle Nutzenergieformen jeweils am richtigen Ort und zur richtigen Zeit kosteneffizient bereitzustellen. Die Schnittstellen zwischen den bisher überwiegend getrennt agierenden Systemen sind Energiewandler, Wärmepumpen, Blockheizkraftwerke, Brennstoffzellen oder Infrastrukturen wie Ladesäulen, Wärmenetze und -speicher usw.

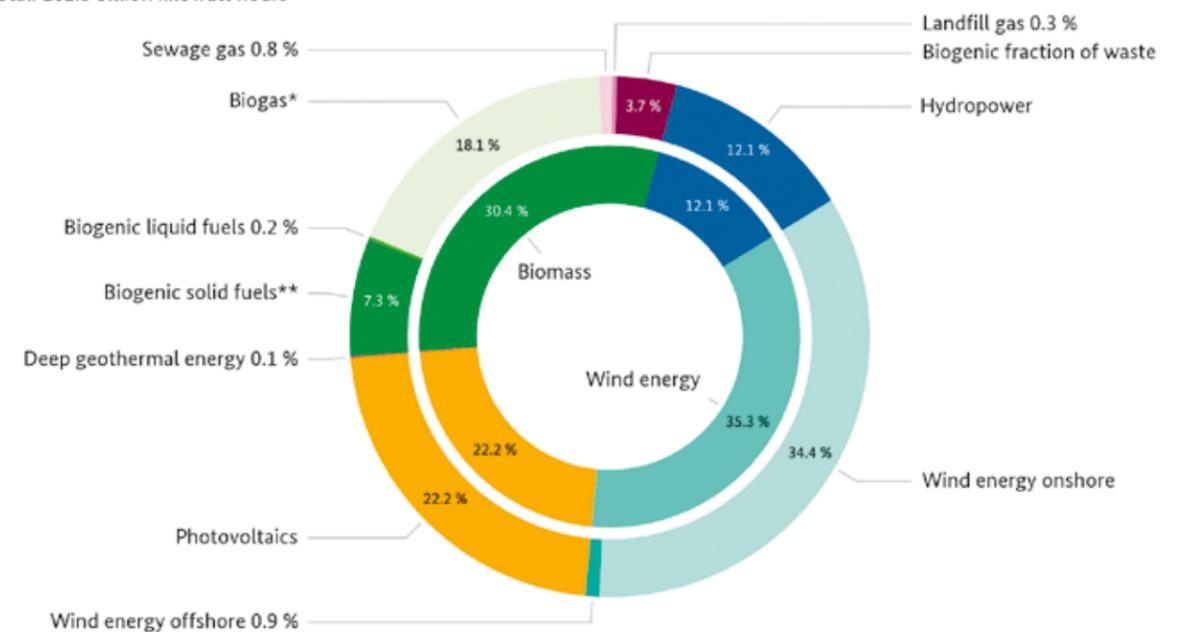
Until now, it has only been possible to replace these with biofuels on a very small scale, since these offer only limited potential, including with regard to sustainability aspects. Electromobility – powered by electric batteries or fuel cells – offers an alternative. Electricity-based, CO<sub>2</sub>-neutral fuels can be deployed like current fossil-based chemical fuels (liquid and gaseous) as a temporary solution in efficient combustion engines. This shows that the mobility sector will also be closely linked with the electricity sector in future.

To date, however, the coupling of the sectors has been solely defined in terms of recycling possible electricity surpluses. Given the climate protection requirements, this point of view is too narrow, however, since it is only through coupling these sectors that there is any possibility for making the overall energy system renewable. To achieve this, however, it is necessary to consider the renewable electricity required by these sectors both for direct applications as well as a raw material for producing electricity-based fuels.

Considering the future energy world as a holistic system enables all useable energy forms to be provided cost-effectively in the right place and the right time. The interfaces between the previously mostly isolated systems are provided by energy converters, heat pumps, CHP plants, fuel cells and infrastructure such as charging stations, heating networks and storage systems, etc.

### Renewables-based electricity generation in Germany 2014

Total: 162.5 billion kilowatt hours



\* incl. biomethane, \*\* incl. sewage sludge; BMWI based on Working Group on Renewable Energy-Statistics (AGEE-Stat); as at December 2015; all figures provisional



# // Focus

// Blockheizkraftwerk.  
// Heat and power plant.

Neben der Bereitstellung geeigneter Energiewandler ist die zeitliche und räumliche Abstimmung der Energieströme notwendig. Da die Hauptenergiequellen der Zukunft, Wind und Sonne, fluktuierend Strom erzeugen, muss das System ein Höchstmaß an Flexibilität aufweisen, was einerseits durch eine zeitliche Verschiebung des Abrufs von elektrischer oder thermischer Energie (Lastverschiebung) und andererseits durch eine geeignete Pufferung in Speichern für Strom, Wärme und chemische Energieträger sowie Infrastrukturen zur Wandlung in eine speicherfähige Form ermöglicht wird. Um das Verschiebungspotenzial auch zwischen den Sektoren maximal nutzen zu können, müssen die Einzelkomponenten entsprechend intelligent vernetzt werden. Das ist nur möglich, wenn sich die Digitalisierung der Energiewende dynamisch fortsetzt. Hierzu zählen beispielsweise die Messung, Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Daten, wenn möglich in Echtzeit, die Entwicklung geeigneter Steuerungssignale und deren realer Einsatz.

## // Kopplung Strom ↔ Wärme

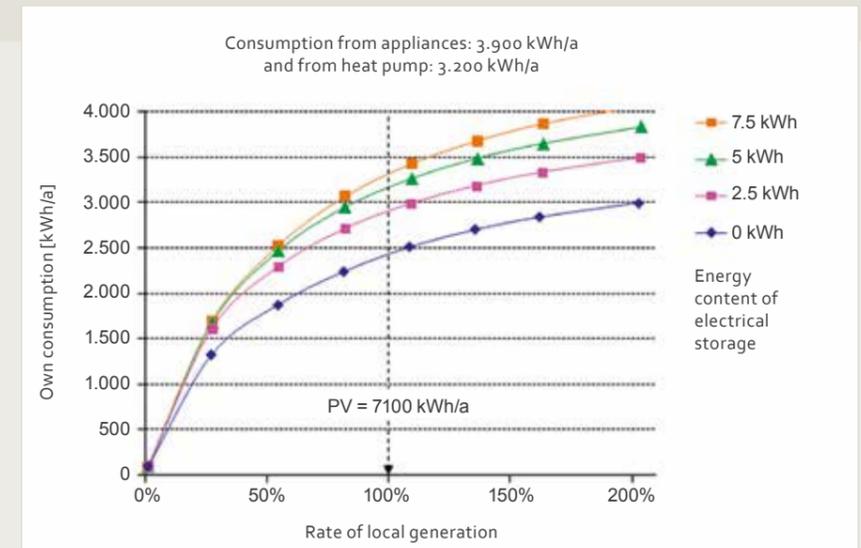
Die Verzahnung der beiden Sektoren Strom und Wärme existiert bereits seit Langem durch die etablierten Technologien der konventionellen Kraft-Wärme-Kopplung hauptsächlich auf der Basis fossiler Brennstoffe. Diese nutzen seit jeher den Vorteil, bei vergleichsweise geringem Brennstoffbedarf sowohl Strom als auch Wärme bereitstellen zu können und damit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zu leisten. Künftig sollen vor allem kleinere Anlagen, sogenannte Blockheizkraftwerke, eine größere Rolle bei der Versorgung von Gewerbe- oder Wohngebieten oder auch von einzelnen Gebäuden spielen. Zusammen

In addition to providing suitable energy converters, the temporal and spatial coordination of the energy flows is also necessary. Since the main energy sources of the future – wind and solar energy – generate intermittent power, the system must have a high degree of flexibility. This will be enabled, on the one hand, by shifting the retrieval of electrical or thermal energy (load shifting) and, on the other, by providing not only suitable buffering in storage systems for electricity, heat and chemical energy carriers but also infrastructure for converting the energy into a storable form. In order to also maximise the shift potential between the sectors, the individual components need to be connected in an accordingly smart manner. This is only possible if the digitisation of the energy transition continues dynamically. This includes, for example, the measurement, recording, processing and provision of data – if possible in real time – and the development of appropriate control signals and their use in practice.

## // Coupling electricity and heat

The electricity and heating sectors have already been coupled for a long time through the established use of cogeneration technologies based mainly on fossil fuels. These have always had the advantage of being able to produce both electricity and heat with comparatively low fuel consumption and thereby make an important contribution to reducing CO<sub>2</sub> emissions. In future, in particular smaller-scale combined heat and power plants will play a greater role in the provision of industrial and housing estates, or even individual homes.

// Eigenverbraucher Strom in Abhängigkeit von der Auslegung der PV-Anlage und des Energieinhalts einer lokalen Batterie. Angenommen ist ein gut gedämmtes Haus mit rund 140 m<sup>2</sup> Wohnfläche sowie einem Strombedarf für Haushaltsgeräte von rund 3.900 kWh/a.  
// Self-generated electricity in accordance with the design of the PV system and the energy content of a local battery. This is based on a well-insulated house with around 140 m<sup>2</sup> of living space and an electricity demand for household appliances of around 3,900 kWh/a.



können sich die Einzelanlagen zu einem sogenannten Schwarm zusammenfügen, der Strom bedarfsgerecht erzeugt und anbietet. Um dieses Flexibilitätspotenzial für den Stromsektor ebenso wie das Treibhausgasreduzierungs-potenzial der gekoppelten Erzeugung optimal nutzen zu können, sind Wärmespeicher und -netze in entsprechender Dimensionierung zwingend erforderlich. Auch elektrische Wärmepumpen und erneuerbare Wärmequellen wie Solarthermie, Umweltwärme, oberflächennahe und Tiefengeothermie sind in derartigen Systemen einsetzbar.

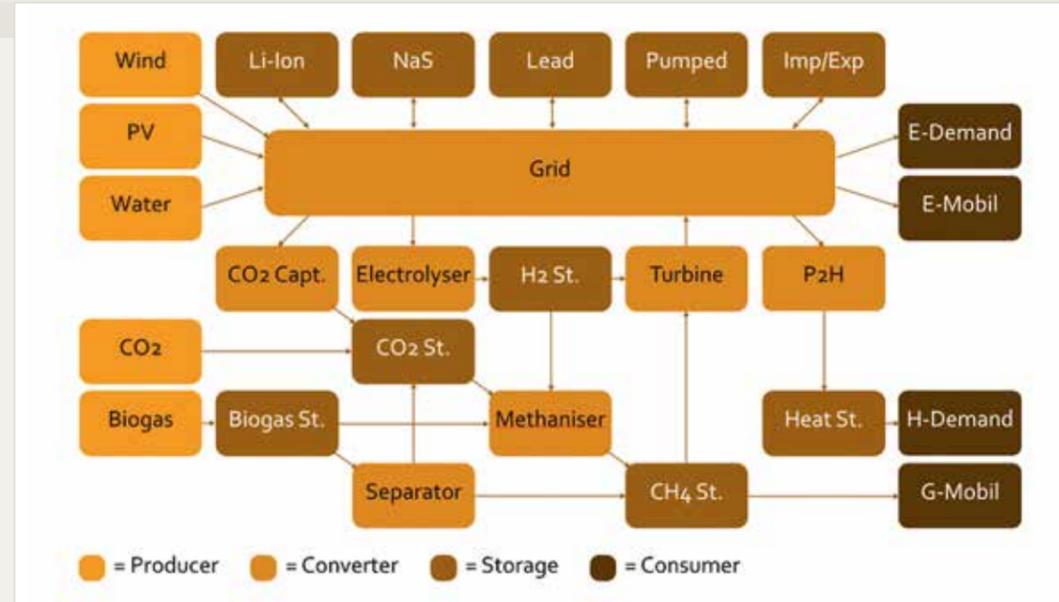
Für Verbraucher mit einer eigenen Photovoltaik(PV)-Anlage ist die Wärmebereitstellung über eine Wärmepumpe besonders effizient. Ein thermischer Speicher hilft, einen möglichst hohen Anteil des eigenen Wärmebedarfs aus Umweltwärme unter Nutzung des selbst erzeugten Stroms aus der PV-Anlage zu decken. Mit einem elektrischen Speicher lässt sich über Tag erzeugte elektrische Energie in den Abendstunden nutzen. Studien des ZSW zeigen, dass sich so in einem modernen Einfamilienhaus über das Jahr verteilt rund 50 % des Wärme- und Strombedarfs durch Solarstrom vom eigenen Dach decken lassen. Im Beispiel aus dem Bild oben ist dieser Wert bei einer PV-Anlage erreicht, die im Jahr rund 9.200 kWh/a erzeugt, bei einem Strombedarf für Haushaltsgeräte und Wärmepumpe von insgesamt 7.100 kWh/a. Dann werden rund 3.550 kWh/a vom eigenen Dach und dieselbe Menge vom Netzbetreiber während Zeiten geringer Sonneneinstrahlung bezogen. Die verbleibenden 5.650 kWh/a an PV-Strom zu Zeiten hoher Sonneneinstrahlung abzüglich der Verluste der Anlagentechnik werden vom Netzbetreiber abgenommen und stehen anderen Kunden als Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung.

Sonne und Wind ergänzen sich in Deutschland sehr gut. Die optimale Deckung des Bedarfs hängt u. a. von der Größe des Betrachtungsraums ab. Daher ist neben der Optimierung der lokalen Installation auch immer das Gesamtsystem im Blick zu behalten. Hierzu hat das ZSW das Software-Tool P<sup>2</sup>IONEER entwickelt, mit dem die optimale Dimensionierung von regenerativen

Together, the individual systems can combine to form a fleet that produces and offers electricity as required. In order to optimally utilise the potential flexibility for the electricity sector and the potential for reducing greenhouse gases through combined generation, heat storage systems and networks are required with appropriate dimensions. Electric heat pumps and renewable heat sources such as solar thermal energy, environmental heat, shallow and deep geothermal energy can also be used in such systems.

The provision of domestic hot water using a heat pump is especially efficient for consumers with their own photovoltaic (PV) systems. Thermal storage systems help to meet a high proportion of users' own heating requirements by utilising environmental heat using self-generated electricity from the PV system. Electrical storage systems enable the electrical energy generated during the day to be used during the evenings. Studies from ZSW show that in the case of modern single family homes, around 50% of the heating and electricity needs can be met by solar power from the homes' own roofs throughout the year. In the example in the image above, this value is reached with a PV system that produces around 9,200 kWh/p.a., with an electricity requirement for household appliances and heat pumps amounting to 7,100 kWh/p.a. Around 3,550 kWh/p.a. is then drawn from the user's own roof and the same amount from the grid operator during periods with low solar radiation. The remaining 5,650 kWh/p.a. of PV electricity generated at times of high solar radiation minus the losses from the plant technology, are drawn off by the grid operator and made available to other customers as electricity from renewable sources.

The sun and wind complement each other very well in Germany. The optimal coverage of the requirement depends, among other things, on the length of the period under consideration. Therefore, in addition to optimising local installations, the whole system also always needs to be considered. For this purpose, ZSW has developed the P<sup>2</sup>IONEER software tool with which the optimal



// Focus

Stromerzeugungsanlagen, Speichern und steuerbaren Erzeugern unter Vorgabe eines gewählten Anteils an erneuerbarer Erzeugung für eine Region berechnet werden kann. Die Optimierung berücksichtigt dabei spezifische Investitionskosten ebenso wie lokale Lastprofile. In Kombination mit über mehrere Jahre erhobenen Wetterdaten ergibt sich ein optimaler Erzeugungsmix zu den geringstmöglichen Stromerzeugungskosten. Auf regionaler Ebene können so bis zu 80 % des aus Sonne und Wind erzeugten Stroms direkt zur Deckung des Strombedarfs genutzt werden; lediglich 20 % des Bedarfs müssen zwischengespeichert oder aus steuerbaren Quellen wie Biogasanlagen erzeugt werden.

Darüber hinaus ist das ZSW an den beiden Projekten EnVisaGe und EnSource beteiligt, die diese Erkenntnisse in Fallstudien anwenden, im Labor und Feldtest die Eigenschaften der Anlagentechnik charakterisieren und die notwendige Steuerungstechnik – sowohl lokal als auch zum Energieversorger – beleuchten.

Mit dem Ziel, die verschiedenen Energieformen nicht nur zum richtigen Zeitpunkt, sondern auch am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen, kommt der Auslegung der Netze bzw. der Belastung vorhandener Netze Bedeutung zu, ebenso wie der optimalen Platzierung von Speichern bzw. Energiewandlern und deren Betrieb. Bisher waren Verteilnetze auf eine hohe Zahl von Verbrauchern ausgelegt mit im Mittel geringer Gleichzeitigkeit von Verbrauchsspitzen. Auch wenn die transportierte Energie im Jahresmittel nicht höher ist als der lokale Verbrauch, liefern regenerative Erzeugungsanlagen jedoch zeitgleich Leistungsspitzen über mehrere Stunden. Das kann Netze und Betriebsmittel überlasten. Projekte am ZSW wie PVSYS-NS und Grid-Predict zielen darauf ab, Speicher und Energiewandler, die ohnehin zur zeitlichen Verschiebung der Energiebereitstellung benötigt werden, so zu betreiben und im Netz zu platzieren, dass der Bedarf für den Ausbau im Verteilnetz sinkt.

size of renewable energy generation systems, storage systems and controllable generators can be calculated by specifying the proportion of renewable generation for a region. The optimisation takes into account specific investment costs as well as local load profiles. Combined with weather data collected over several years, this provides an optimal production mix at the lowest possible electricity generation costs. At the regional level, this enables up to 80% of the electricity generated from solar and wind power to be directly used for meeting the electricity demand; only 20% of the requirement has to be temporarily stored or generated from controllable sources such as biogas plants.

In addition, ZSW is also involved in the EnVisaGe and EnSource projects that are applying this knowledge in case studies, characterising the properties of the system technology in laboratory and field tests, and are highlighting the necessary control technology – both locally and at energy providers.

With the aim of providing the various forms of energy not only at the right time but also at the right place, this places particular importance both on the design of networks and the loads on existing grids as well as on the optimal placement and operation of storage systems and energy converters. Until now, distribution networks have been designed for a high number of loads with, on average, few peak loads occurring simultaneously. However, even if the average energy transported over the year does not exceed the local consumption, renewable energy generation systems simultaneously provide peak outputs over several hours. This can overload networks and resources. Projects at ZSW, such as PVSYS-NS and Grid-Predict, are aimed at operating and placing storage systems and energy converters in the grid that are anyway required for time displacement of the energy provision so that the need for expanding the distribution network is reduced.

#### // Kopplung Strom ↔ Mobilität

Elektrizität ist eine sehr hochwertige und vielfältigst wandelbare, aber auch eine sehr flüchtige Form der Energie: Sie setzt die Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch voraus. Sie kann zwar über Netze lokal und regional weit verteilt werden, man kann sie aber nicht ohne Weiteres „mitnehmen“, was wiederum bei der Mobilität definitionsgemäß notwendig ist. Eine direkte Einbindung der Mobilität in den Stromsektor ist im Grunde nur für den elektrifizierten, schienengebundenen Verkehr möglich. Dasselbe gilt für Fahrzeuge wie Trolleybusse, die ihren Strom über Oberleitungen beziehen, oder den sich im Forschungsstadium befindenden, oberleitungsgebundenen elektrischen Betrieb von schweren Nutzfahrzeugen für den Güterverkehr. Für den gesamten Individualverkehr in Pkw, Lkw oder Flugzeug muss der Verbrauch jedoch von der Erzeugung durch den Einsatz von speicherbaren Energieformen zeitlich entkoppelt werden. Geht man von Strom als Primärenergie aus, bieten sich dafür im Wesentlichen zwei Wege an: der elektrochemische Speicher (Batterie) für den elektrischen Antrieb oder ein chemischer Energieträger; gasförmig als Elektrolyse-Wasserstoff für Brennstoffzellen oder als Synthesegas (methanisierter Elektrolyse-Wasserstoff) für verbrennungsmotorische Erdgasantriebe. Gegebenenfalls lassen sich auch flüssige Kraftstoffe wie synthetisches Benzin oder Diesel herstellen, allerdings mit geringer Effizienz und zu höheren Kosten.

Für die Elektromobilität im Bereich der Pkw hält der Markt heute batterieelektrische Fahrzeuge (BEV, battery electric vehicle) und Hybride aus elektro- und verbrennungsmotorischen Antrieben (PHEV, plug-in hybrid electric vehicle) bereit. Die PHEV verfügen über eine elektrische Reichweite von 30 bis 50 km, was für das Gros der täglichen Autofahrten ausreicht. Für das rein elektrische Fahren gänzlich frei von lokalen Emissionen verfügen BEV über deutlich größere Batterien (20 bis 80 kWh) als die PHEV (5 bis 15 kWh) und erreichen damit Reichweiten von 120 bis 450 km. Die Zulassungs-

#### // Coupling electricity and mobility

Highly convertible, electricity is a high qualitatively but also very volatile form of energy: it presupposes the simultaneity of generation and consumption. Although it can be distributed locally and over large distances regionally, it cannot be simply taken, which by its very definition is necessary with mobility. The direct integration of mobility in the electricity sector is basically only possible for electrified, rail-based transport. The same applies to vehicles that draw their power from overhead lines such as trolleybuses or the overhead line-based electrical operation of heavy goods vehicles for transporting freight, which is currently in the research stage. For all individual transport in cars, lorries or aircraft, however, the consumption has to be temporally decoupled from the generation through the use of storable energy forms. If electricity is the primary energy, there are two main ways of doing this: using electrochemical storage systems (batteries) for the electrical propulsion or, alternatively, using a chemical energy carrier, either in gaseous form as electrolysis hydrogen for fuel cells or as synthesis gas (methanised electrolysis hydrogen) for natural gas-based combustion engines. Optionally liquid fuels (e.g. synthetic gasoline or diesel) can also be prepared but with lower efficiency and higher costs.

In terms of cars, the electromobility market currently provides battery electric vehicles (BEVs) and hybrid cars combining electric motors with combustion engines (PHEVs, plug-in hybrid electric vehicles). The PHEVs have an electrical range of 30 to 50 km, which is sufficient for the majority of daily car trips. For purely electrically powered driving entirely free of local emissions, BEVs have much larger batteries (20 to 80 kWh) than PHEVs (5 to 15 kWh) and thus achieve ranges from 120 to 450 km. The number of registrations in Germany is still low, but internationally the emergence of a substantial and exponentially growing market can be observed. The operating costs of electric vehicles are, however, already



## // Focus



zahlen in Deutschland sind noch gering, international lässt sich aber das Entstehen eines substantiellen und exponentiell wachsenden Marktes beobachten. Die Betriebskosten von Elektrofahrzeugen sind bereits heute unschlagbar günstig. Herausforderungen stellen bis dato die eingeschränkte Reichweite, die langen Ladezeiten und die hohen Anschaffungskosten dar. Diesen Herausforderungen für eine erfolgreiche Verbreitung von Elektrofahrzeugen stellt sich das ZSW jedoch mit seiner Forschung und Entwicklung entlang seiner gesamten Wertschöpfungskette. Auf Materialebene forscht man an Batterietechnologien der nächsten Generation, die über eine höhere Energiedichte verfügen und zu niedrigeren energiespezifischen Kosten und höheren Reichweiten der Elektrofahrzeuge führen. Für die Materialsynthese, die Zellentwicklung und die Fertigung werden für alle Prozessschritte entsprechende Anlagen und Untersuchungsmethoden eingesetzt. An der Schnittstelle von Materialwissenschaft und Systemtechnik erarbeitet das ZSW im Rahmen des Projekts LoLiFast Verfahren für die Schnellladung von Lithium-Ionen-Batterien unter Erhalt der Lebensdauer. Auf der Systemseite erforscht das ZSW Algorithmen der Lade- und Alterungszustandserkennung, Methoden der Diagnose von Degradation, Fehlern und Sicherheit von Batterien sowie Strategien für einen alterungsminimalen Betrieb der Batterie. Im Batterietestfeld werden Batterien hinsichtlich ihrer Performance, Lebensdauer und Sicherheit geprüft.

Im Sinne der Kopplung der Sektoren erforscht das ZSW seit mehreren Jahren die Wechselwirkungen von Stromnetz und elektrischen Fahrzeugen. Sind Letztere über die jeweilige Ladeinfrastruktur am Netz angeschlossen, kann man sie wie PV-Speicher als verteilte Speicherressourcen betrachten, die positive und negative (Regel-)Leistung bereitstellen können (vehicle to grid). Die technische Voraussetzung dazu sind die Kommunikation mit dem Smart Grid oder dem Speicheraggregator und ein bidirektionaler Laderegler; aber auch über eine Reduktion der Ladeleistung oder eine Verschiebung des Ladevorgangs lassen sich effektiv positive Leistungen dem Netz zuführen. In den Projekten Net-ELAN, Net-INES und komDRIVE wurden die wirtschaftlichen Potenziale der

unbeatable cheap. Challenges until now have included the limited range, long charging times and high cost. ZSW faces these challenges with its research and development along the entire value added chain to achieve the successful dissemination of electromobility. At the material level, it is researching next-generation battery technologies that have a higher energy density and result in lower energy costs and longer specific ranges for electric vehicles. For the material synthesis, cell development and production, suitable equipment and testing methods are being used for all process steps. At the interface between materials science and system technology, ZSW is developing methods for fast charging Li-ion batteries while maintaining battery life as part of the LoLi-Fast project. On the system side, ZSW is researching algorithms for identifying charge and ageing states, methods for diagnosing battery degradation, faults and safety, as well as strategies for minimising ageing when operating batteries. In the battery test field, batteries are tested in terms of their performance, durability and safety.

With the aim of coupling sectors, ZSW has been researching the interaction of the electricity grid and electric vehicles for several years. If the latter are connected to the grid via the respective charging infrastructure, they can – in the same manner as PV storage systems – be regarded as distributed storage resources that can provide positive and negative (control) power (vehicle to grid). A technical prerequisite for this is communication with the smart grid or the storage unit and a bidirectional charge controller. However, effective, positive benefits for the grid can also be achieved by reducing the charging capacity or shifting the charging processes. The Net-ELAN, Net-INES and KomDrive projects have investigated the economic potential of grid coupling as well as the impact of the charging behaviour on both the distribution network and the entire energy system of passenger cars and vehicle fleets for urban freight transport. A particular focus was on testing, modelling

Netzkopplung, die Auswirkung des Ladeverhaltens auf das Verteilnetz und das gesamte Energiesystem von Pkw und Fahrzeugflotten für den städtischen Güterverkehr untersucht. Besonderes Augenmerk lag auf den Themen Test, Modellierung und Simulation der Alterung der Fahrzeugbatterie bei zusätzlichem Energiedurchsatz für Netzdienstleistungen.

Der zweite Weg, erneuerbare Energien in den Mobilitätssektor einzuführen, wird über die Kombination von Elektrolyse-Wasserstoff, Druckbetankung und Brennstoffzellenantriebe beschritten. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) können ein Verkehrsegment bedienen, das höhere Anforderungen an die individuelle Mobilität hinsichtlich Reichweite (>450 km) und Tankdauer (<5 min) stellt. Die Technologie, die sich dafür etabliert hat, ist die Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle (PEM), deren Herausforderung für eine erfolgreiche Markteinführung in der wechselseitigen Beeinflussung von Leistungsdichte, Lebensdauer und Kosten liegt. Am ZSW wird intensiv an einem Durchbruch dieser Technologie gearbeitet: von den elektrochemischen Grundlagen und Komponenten über die Stackentwicklung und -fertigung, die Systemtechnik und den Performance-, Lebensdauer- und Sicherheitstest bis hin zur Wasserstoff-Infrastruktur und Wasserstoffqualität. Letzteres wird 2016 im Rahmen des Aufbaus einer H<sub>2</sub>-Tankstelle am Standort in Ulm vorangetrieben. Bei allen technischen Unterschieden der genannten Fahrzeugtypen und Antriebsarten bleibt letztlich festzuhalten, dass der größte Beitrag der direkten (BEV) und indirekten (FCEV) Elektromobilität zur Erreichung der Klimaziele deren Effizienz ist, also die Reduktion des Primärenergieaufwands für jeden gefahrenen Kilometer.

Der Wirkungsgrad der Wandlung von der Primärenergie Strom zur Fahrleistung (Well-to-Wheel) übersteigt bei BEV (73 %) und

and simulating the ageing of the vehicle batteries with an additional energy throughput for grid services.

The second approach for introducing renewable energies into the mobility sector is being taken by combining electrolytic hydrogen, pressure refuelling and fuel cell drives. Fuel cell electric vehicles (FCEVs) can serve a transport segment that places greater demands on individual mobility in terms of range (>450 km) and fuel duration (<5 min). The technology that has become established in this regard is the polymer electrolyte fuel cell (PEFC), whereby the challenge for its successful launch lies in the mutual influence of the power density, service life and costs. At ZSW, intensive research and work is being conducted to achieve a breakthrough in this technology, ranging from the electrochemical fundamentals and components, as well as the stack development and production, to the system technology and performance, durability and safety testing along with the hydrogen infrastructure and quality. The latter is being progressed in 2016 with the construction of a H<sub>2</sub> filling station at the headquarters in Ulm. With all the technical differences regarding the aforementioned vehicle and engine types, it should ultimately be noted that the greatest contribution made by direct (BEV) and indirect (FCEV) electromobility to achieving the climate goals is their efficiency, i.e. the reduction in the primary energy input for each kilometre driven.

The (well-to-wheel) efficiency in converting primary energy electricity to mileage (73% for BEVs and 32% for FCEVs) far exceeds today's internal combustion engines (18-22%), and at 0 g CO<sub>2</sub>/km.



FCEV (32 %) bei Weitem den Wirkungsgrad heutiger Verbrennungsmotoren (18–22 %) und das bei 0 g CO<sub>2</sub>/km.

#### // Strom als Rohstoff

Um in einem künftigen Energiesystem, das zunehmend auf erneuerbaren Quellen beruht, die drei Sektoren Strom, Wärme und Mobilität miteinander zu koppeln, sind flexible und effektive Energiewandler gefragt. Darunter sind vor allem all jene Prozesse und Verfahren zu verstehen, die allgemein mit dem Begriff „Power-to-X“ (PtX) bezeichnet werden und der Erzeugung chemischer Energieträger dienen. Große Beachtung findet etwa die maßgeblich am ZSW entwickelte Power-to-Gas (P2G<sup>®</sup>)-Technologie. Dabei wird regenerativ erzeugter Strom in einem Elektrolyseverfahren in Wasserstoff und bei Bedarf in einer Methanisierungsstufe – unter Hinzugabe von CO<sub>2</sub> – in Methan umgewandelt. Weitere Umwandlungsschritte, etwa in flüssige Energieträger, sind ebenfalls möglich. Alle erzeugbaren chemischen Rohstoffe bzw. Energieträger lassen sich direkt nutzen – in der Industrie, zum Heizen oder für die erneuerbare Mobilität als regenerativer Kraftstoff für Brennstoffzellen- bzw. Erdgasfahrzeuge.

Für die künftige Mobilität lassen sich elektrolytisch erzeugter Wasserstoff und Methan überall dort einsetzen, wo batterieelektrische Antriebe an ihre Grenzen stoßen: etwa im Langstrecken- und Schwerlastverkehr. In Anlehnung an P2G<sup>®</sup> können im sogenannten Power-to-Liquid-Verfahren (PtL) auch flüssige Kraftstoffe aus Strom erzeugt werden. So können Schiffe mit CO<sub>2</sub>-neutralem LNG (liquefied natural gas) und Flugzeuge mit ebenso klimafreundlichem synthetischem Kerosin betankt werden.

Besteht kein aktueller Bedarf in der Mobilität, können sowohl Wasserstoff als auch das synthetische Methan saisonal und nahezu verlustfrei im Erdgasnetz oder in Erdgasspeichervorrichtungen gespeichert werden. Insbesondere wenn ein Überangebot an Strom besteht, sollen die CO<sub>2</sub>-neutralen chemischen Rohstoffe hergestellt werden.

#### // Electricity as a raw material

In order to couple the three sectors electricity, heat and mobility in a future energy system that is increasingly based on renewable sources, flexible and effective energy converters are required. These in particular include those processes and procedures that are commonly referred to by the term “Power-to-X” and are used to generate chemical energy. For example, the Power-to-Gas (P2G<sup>®</sup>) technology, which has been largely developed at ZSW, has attracted a great deal of attention. Here renewably generated electricity is converted in an electrolysis process into hydrogen and, if required, then into methane in a methanisation stage by adding CO<sub>2</sub>. Further conversion steps, such as in liquid energy sources, are also possible. All producible chemical raw materials or fuels can be directly used – in industry, for heating or for renewable mobility as a renewable fuel for fuel cell and natural gas vehicles.

For future mobility, electrolytically generated hydrogen and methane can be deployed everywhere where battery-electric motors reach their limits: such as in long-distance and heavy-load vehicle transport. Based on P2G<sup>®</sup>, liquid fuels can also be produced from electricity in so-called Power-to-Liquid (PtL) processes. This makes it possible to fuel ships with CO<sub>2</sub>-neutral LNG (liquefied natural gas) and airplanes with climate-friendly synthetic kerosene.

If there is no current need for mobility purposes, both hydrogen and synthetic methane can be seasonally stored with virtually no loss in the natural gas grid or in natural gas storage facilities. In particular the CO<sub>2</sub>-neutral, chemical raw materials can be produced when there is an oversupply of electricity.

As an energy carrier, hydrogen can be converted back into electricity again when there is increased demand for electricity, ideally in modern gas and steam power plants or stationary fuel cells. This usage path also makes P2G<sup>®</sup> considerably important for grid



## // Focus

In Zeiten erhöhter Stromnachfrage können diese als Energieträger dann wieder verstromt werden, idealerweise in modernen Gas- und Dampfkraftwerken oder stationären Brennstoffzellen. Dieser Verwendungspfad hat auch eine große Bedeutung von P2G<sup>®</sup> für die Netzstabilisierung, das Lastmanagement und die bedarfsgerechte Bereitstellung und Nutzungsmöglichkeiten von Strom sowie Brenn- und Kraftstoffen. Hierdurch kann diese Technologie auch einen wichtigen Beitrag zur Versorgungssicherheit im Energiesystem der Zukunft leisten.

Auch der Wärmebedarf kann Teil der PtX-Kreisläufe sein: Sowohl bei P2G- als auch bei PtL-Prozessen entsteht Wärme, die als Abwärme zum Heizen oder für industrielle Verfahren effektiv genutzt werden kann und dadurch auch die Wirkungsgrade der Technologien erhöht. Zudem können Blockheizkraftwerke auf Basis von erneuerbaren Energien zu flexiblen Erzeugern und Verbrauchern weiterentwickelt werden, die helfen, das Stromsystem in Abstimmung mit dem Wärmebedarf zu stabilisieren. Hierzu zählen auch elektrische Wärmepumpen und die gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung aus geothermischen Quellen.

Ausgangsstoff bei sämtlichen PtX-Technologien ist Strom. Im skizzierten vernetzten Energiesystem der Zukunft wird er somit nicht mehr nur Energieform, sondern vielmehr Rohstoff sein. Daher ist der Schlüssel zum System der Zukunft der konsequente Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten ebenso wie der jeweils geeigneten PtX-Technologien auf allen Ebenen. Das ist zugleich die Voraussetzung für einen vielversprechenden Ansatz bei der Biomassennutzung. Das ZSW-Konzept sieht u. a. die Kopplung von Biomasse und Wasserstoff vor. Die im Gegensatz zu Sonne und Wind knappe Ressource Biomasse soll für die Herstellung von nachhaltigen klimafreundlichen Kraftstoffen der

stabilisation, load management and the provision and use of electricity and fuels in accordance with needs. This technology can thereby help secure supplies in future energy systems.

The heating requirement can also be part of PtX circuits: both P2G and PtL processes produce waste heat that can be effectively used for heating or industrial processes and thus effectively increases the efficiency of the technology. In addition, cogeneration plants based on renewable energies can be further developed into flexible producers and consumers that help to stabilise the power system in coordination with the heat demand. These also include electric heat pumps and the combined heat and power supply from geothermal sources.

The starting material for all Power-to-X technologies is electricity. In the outlined networked energy system of the future, it will therefore no longer be just a form of energy but rather a commodity. Thus the key to the system of the future is to consistently expand the capacities for generating renewable electricity along with the respectively suitable Power-to-X technologies at all levels. This is also the prerequisite for a promising approach in the use of biomass. ZSW's concept envisages the coupling of biomass and hydrogen. Biomass, which in contrast to the sun and wind is a scarce resource, should be reserved for producing sustainable, climate-friendly fuels of the latest generation and thus be used in the most ecological and efficient way possible. Since biomass is the only carbon-containing renewable energy source and carbon-based fuels are still required for specific mobility areas, it can play an important role in future mobility. Compared with the currently used method for producing biodiesel and bioethanol, the coupling of hydrogen enables the fuel yield from biomass to be increased six-fold. At the same time, the acreage required is reduced to

neuesten Generation reserviert und so ökologisch sinnvoll sowie so effizient wie möglich genutzt werden. Da Biomasse die einzige kohlenstoffhaltige erneuerbare Energiequelle ist und für bestimmte Bereiche der Mobilität weiterhin kohlenstoffbasierte Kraftstoffe benötigt werden, kann sie in der Mobilität der Zukunft eine wichtige Funktion wahrnehmen. Mit der Einkopplung von Wasserstoff lässt sich der Kraftstofftrag aus Biomasse im Vergleich zu den heute üblichen Verfahren zur Gewinnung von Biodiesel und Bioethanol um das Sechsfache steigern. Umgekehrt bedeutet dies, dass die benötigte Anbaufläche auf ein Sechstel sinkt. Eine unerwünschte Konkurrenz von Energie-Biomasse zum Nahrungsmittelanbau kann somit vermieden werden.

Das Biomassekonzept des ZSW zeigt einmal mehr, dass sich mit Hilfe von Wandlungsverfahren zur Herstellung chemischer Energieträger vielfältige Nutzungsmöglichkeiten ergeben, die die sinnvolle, multidirektionale Verzahnung der drei Sektoren befördern und damit zur sicheren, flexiblen und bedarfsgerechten Bereitstellung von klimafreundlicher Energie beitragen.

## // Digitalisierung

Viele Transformationsprozesse auf den unterschiedlichen Ebenen und in den verschiedenen Bereichen des Energiesystems werden erst durch die wachsende Digitalisierung möglich bzw. können sich durch die Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) deutlich dynamischer verbreiten. Prominentes Beispiel ist der Wandlungsprozess vom konventionellen Elektrizitätsnetz zum sogenannten Smart Grid, der nur durch den Einsatz von Kommunikations-, Mess-, Steuer-, Regel- und Automatisierungstechnik sowie IT-Komponenten erfolgen kann. Dabei bedeutet „smart“ die Erfassung der Netzzustände in Echtzeit sowie eine deutlich erhöhte Ausnutzung der vorhandenen Netzkapazität durch die Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten oder – bei gleicher Auslastung – eine Verbesserung der Netzstabilität.

In Bezug auf Verteilernetze wird unter Smart Grid auch die zunehmend bessere Möglichkeit verstanden, Systemzustände im Netz nachzuvollziehen und lokal einzugreifen. Das bedeutet auch, dass verschiedene Parameter, die in einem konventionellen Netz bislang fixierte Größen waren, variabel werden. In smarten Netzen lassen sich z. B. Kapazitäten lokal und temporär erhöhen oder Stromflussrichtungen über einzelne Leitungsabschnitte verändern, wenn es die Einspeisesituation erfordert. Smart-Grid-Strukturen sollen zudem die Grundlage dafür schaffen, dass auch kleine Netznutzer verstärkt Möglichkeiten marktlichen Handelns (Smart Market) wahrnehmen können, ohne Einbußen bei der Netzsicherheit zu riskieren.

Aktuelle Forschungsansätze beispielsweise im Projekt C/sells – das ZSW bringt hier sein Know-how zur Einspeiseprognose von erneuerbaren Energien ein und wird dies um Lastprognosen erweitern – beschäftigen sich u. a. mit einem zellulären Netzinfrastrukturaufbau. Als Zellen können dabei sowohl einzelne Liegen-

one sixth. This therefore avoids the conflict between cultivating crops for energy biomass and food production.

ZSW's biomass concept once again shows that by using conversion processes for producing chemical energy carriers, a diverse range of applications can be created that foster the sensible, multi-directional interlinking of the three sectors and thus contribute to the secure, flexible and needs-based provision of climate-friendly energy.

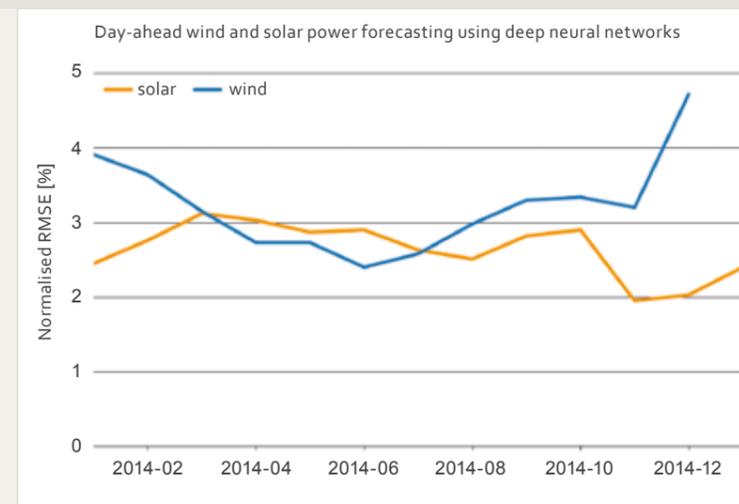
## // Digitisation

Many transformation processes at different levels and in different areas of the energy system are either only possible through the digitisation, which is increasing or, on the other hand, are able to spread much more dynamically as a result of developments in the field of information and communication technology (ICT). A prominent example is the conversion of conventional electricity networks into so-called smart grids, which can only be achieved through the use of communications, instrumentation, control and automation technology and IT components. Here, "smart" refers to the detection of grid conditions in "real time" as well as the significantly increased utilisation of existing grid capacities through control and regulation options along with improved network stability for any given load.

In relation to distribution networks, smart grids also refer to the enhanced ability to track system states in the networks and intervene locally. This also means that various parameters, which in conventional grids were previously fixed sizes, are now variable. In smart grids it is possible, for example, to increase capacities locally and temporarily or change the direction of electricity flows across individual line sections if required by the infeed situation. It is also intended that smart grid structures provide small network users with greater possibilities for market-based trading (Smart Market) without compromising grid safety.

Current research approaches such as in the C/sells project, where ZSW is applying its knowledge on renewable energy feed-in forecasts and expanding it to include load forecasts, are concerned with, among other things, cellular development of the grid infrastructure. Cells here can refer to individual properties ("smart homes"), districts, site networks or even entire regions.

These cells act autonomously, but are linked in supra-regional networks and interact with one another. For example, each cell primarily supplies itself in a subsidiary sense, whereby the energy



// Mittlerer quadratischer Fehler normiert auf die installierte Leistung (nRMSE) für Day-ahead-Wind- und -PV-Prognosen für Deutschland im Jahr 2014. Der Vorhersagefehler für die Windleistungsprognose konnte auf 3,4% im Jahresmittel gesenkt werden. Ende des Jahres zeigte sich ein besonders turbulentes Wettergeschehen.  
// nRMSE normalised with the installed capacity for day-ahead wind and PV forecasts for Germany in 2014. The forecast error for wind power forecasts was lowered to 3.4% for the annual average. At the end of the year, there were particularly turbulent weather conditions.

schaften („Smart Homes“), Quartiere, Arealnetze oder auch ganze Regionen definiert werden. Diese Zellen handeln jeweils autonom, sind aber im überregionalen Verbund vernetzt und interagieren miteinander. So sorgt jede Zelle im subsidiären Sinne primär für sich, indem Energieerzeugung und Last nach Möglichkeit ausgeglichen werden. Infrastrukturdienstleistungen werden bedarfsbedingt zusätzlich bezogen, um die Zelle individuell zu stabilisieren. Durch den Zellverbund und im gemeinschaftlichen Handeln innerhalb und zwischen den Zellen sowie über deren Grenzen hinweg könnte eine sehr robuste Energieinfrastruktur entstehen.

Die am ZSW in der Forschungsgruppe SimOpt entwickelten Verfahren, die eine genauere Vorhersage des komplexen Zusammenspiels innerhalb des Stromsystems ebenso wie systemübergreifend ermöglichen, sind hier ein wichtiger Erfolgsfaktor. Einbezogen werden Wettermodell-Prognosen, Satellitendaten, Wetterstationsmessungen sowie historische Wind-, Solar- und Laufwassererträge eines Standorts oder einer Region bis hin zur Größe von ganz Deutschland, um die Erzeugungssituation vorherzusagen. Die Verbrauchsseite ebenso umfassend abzubilden, stellt eine der Herausforderungen dar. Das ZSW verwendet aktuellste Algorithmen der künstlichen Intelligenz, besonders aus der Klasse der maschinellen Lernverfahren. Sie haben die Fähigkeit, physikalisch berechnete Wind-, Sonneneinstrahlungs- oder Leistungsvorhersagen nochmals entscheidend zu verbessern, indem sie das Zusammenspiel der zahlreichen Parameter, die sich unterhalb der Auflösung physikalischer Modelle bewegen, aus langjährigen Messzeitreihen erlernen und auf die jeweils aktuelle Wettersituation anwenden. Auch systematische Abweichungen, wie sie sich stets in physikalischen Modellen finden, werden hierbei automatisch korrigiert. Damit bietet sich ein enormes Potenzial im Rahmen der Kopplung der Sektoren, das Gesamtenergiesystem klimaneutral und gleichzeitig kostenoptimal zu gestalten.

generation and loads are balanced as far as possible. Infrastructure services are additionally drawn upon as required to stabilise cells individually. The cell network and the collective action within and between the cells as well as beyond the boundaries could create a very robust energy infrastructure.

The processes developed at ZSW in the SimOpt research group, which enable a more accurate prediction of the complex interactions both within the electricity system as well as across various systems, represent an important success factor in this respect. In order to predict the generation situation, use is made of weather model forecasts, satellite data, weather station measurements as well as historical wind, solar and hydroelectric yields for a given site or region that can be as large as Germany. Depicting the load side just as comprehensively represents one of the challenges here. ZSW uses the latest artificial intelligence algorithms, particularly those used in machine-learning techniques. They can make a further decisive improvement to physically calculated wind, solar irradiance and output forecasts by learning from long-standing measurement time series how the numerous parameters moving below the resolution of physical models interact, and by then applying this to the current weather situation. The systematic deviations always found in physical models are also automatically corrected. Here, coupling the sectors offers enormous potential for shaping the overall energy system in a carbon-neutral and cost-effective manner.



**// Fachgebiete und Projekte**  
Departments and Research Projects

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

### // Unsere Kernkompetenzen

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende bei gleichzeitiger Einhaltung der Klimaschutzziele bis 2020 bleibt das dominierende Thema der deutschen Energiepolitik. Diskutiert werden neue Instrumente zur Markt- und Systemintegration erneuerbarer Energien ebenso wie ein adäquates Strommarktdesign. Auch das Thema Energieeffizienz im Gebäudesektor steht zunehmend im Fokus, während der Verkehrsbereich bislang kaum Beachtung findet. Im Lichte des Klimavertrags von Paris müssen die Anstrengungen in allen Bereichen deutlich verstärkt werden, damit Deutschland mit einer erfolgreichen Energiewende der reklamierten internationalen Vorreiterrolle gerecht wird und sowohl ökonomisch als auch gesellschaftlich davon profitiert.

Das interdisziplinär besetzte Fachgebiet Systemanalyse berät die Politik in allen skizzierten Themenfeldern und trägt so aktiv zur Transformation des Energiesystems bei. Neben zahlreichen Aktivitäten im Bereich des Monitorings – vom Ausbau der Erneuerbaren im Rahmen der AGEE-Stat bis zur Unterstützung von Prof. Dr. Frithjof Staiß als Mitglied der Expertenkommission zum Monitoring „Energie der Zukunft“ – ist die Evaluation, Entwicklung und Implementierung von Förderinstrumenten eine Kernkompetenz des Fachgebiets, wie etwa die Weiterentwicklung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes hin zu einem Ausschreibungsmodell zeigt. Auf Landesebene unterstützt das Fachgebiet mit dem Wettbewerb „Leitstern Energieeffizienz“ die Umsetzung der Energiewende in den Stadt- und Landkreisen.

Zur Beantwortung von Fragen zur Integration erneuerbarer Energien und neuer Technologien kommen unterschiedliche Modelle und Analysetools zum Einsatz. So lassen sich mit dem Computermodell P<sup>2</sup>IONEER energieautarke Städte oder Regionen mit definierten Anteilen erneuerbarer Energien bis zur Vollversorgung modellieren, simulieren und vor allem in Bezug auf die Stromerzeugungskosten optimieren. Leistungsfähige Vorhersagesysteme für die Einspeisung von Wind-, Photovoltaik- und Wasserkraftstrom vervollständigen das Kompetenzprofil.



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

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

### // Our main focus

The successful implementation of the energy transition while meeting the climate protection goals set for 2020 remains the central theme of German energy policy. New tools for market and system integration of renewable energy sources as well as a suitable electricity market design are aspects of the ongoing discussion. The topic of energy efficiency in the building sector is becoming increasingly important, while the transport sector has been largely ignored so far. In light of the Paris Climate Agreement, efforts in all areas must be redoubled for Germany to justify its asserted international pioneering role with a successful energy transition and to reap both economic and social benefits.

The interdisciplinary Systems Analysis department provides expert advice to the government on all topics outlined and actively contributes to the progress of the energy system transition in Germany. In addition to numerous activities in the area of monitoring – from the expansion of renewable energies within the framework of AGEE-Stat to support for Prof. Dr. Frithjof Staiß as a member of the Expert Commission for “Energy of the Future” monitoring – the evaluation, development and implementation of support instruments is a core competency of the department, as well as accompanying the further development of the German Renewable Energy Act towards a tender model. On a regional level, the department also actively supports the implementation of the energy transition in the area of energy efficiency with its competition Leitstern Energieeffizienz (Guiding Star Energy Efficiency).

Various models and analysis tools are used to examine issues concerning the integration of renewable energy and new technologies. The P<sup>2</sup>IONEER computer model enables energy-independent cities and regions with a defined proportion of renewable energies of up to 100% to be modelled, simulated and in particular optimised in terms of electricity generation costs. Sophisticated forecasting systems for wind and photovoltaic power feed-in complete our competency profile.

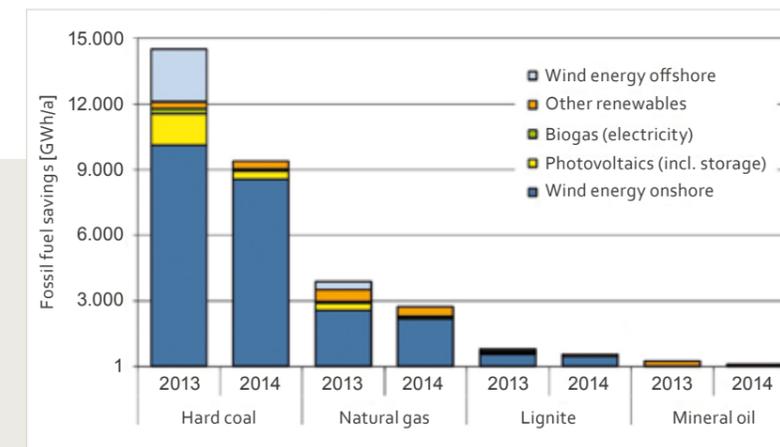
## // Evaluierung der KfW-Förderprogramme für die Erneuerbaren

Evaluation of the KfW loan programmes for renewable energy

### // Evaluierung der KfW-Förderprogramme für erneuerbare Energien

Die KfW Bankengruppe vergibt zinsgünstige Darlehen für Investitionen in die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Ihre Förderaktivitäten leisten einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der entsprechenden Ausbauziele der Bundesregierung. Das Fachgebiet Systemanalyse überprüft seit 2008 jährlich die Wirksamkeit der Förderung. Zu diesem Zweck werden die ausgelöste Einsparung von fossilen Energieträgern, Energieimporten, Treibhausgasemissionen und externen Kosten sowie die daraus resultierenden Beschäftigungswirkungen ermittelt. Für die Förderjahrgänge 2013 und 2014 wurden erstmals auch Effekte geförderter Anlagen mit Standort im Ausland evaluiert. Die ermittelten Wirkungen bilden u. a. die Grundlage der internationalen Berichterstattung für die KfW Green Bonds, über die eines der KfW-Kreditprogramme refinanziert wird.

In den Jahren 2013 und 2014 wurden rechnerisch 42,3 % bzw. 33,5 % aller in Deutschland getätigten Investitionen in den Ausbau erneuerbarer Energien zur Strom- und Wärmezeugung durch KfW-Programme mitfinanziert (ohne Berücksichtigung von Windenergieanlagen auf See). Die geförderten Anlagen in Deutschland vermeiden Jahr für Jahr Energieimporte im Gegenwert von ca. 520 Mio. Euro, Emissionen von rund 9,5 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten sowie etwa 950 Mio. Euro an externen Kosten durch Umwelt- und Gesundheitsschäden. Durch die Herstellung und den Bau der geförderten Anlagen wurden gut 115.000 Arbeitsplätze in Deutschland für ein Jahr gesichert bzw. neu geschaffen, durch den Betrieb und die Wartung der Anlagen finden 20 Jahre lang weitere rund 3.900 Personen Beschäftigung.



// Jährliche Einsparung fossiler Brennstoffe (Primärenergie) durch von der KfW 2013 und 2014 geförderte Vorhaben im Inland.  
// Annual reduction of fossil fuels (primary energy) by national projects funded by KfW in 2013 and 2014.

### // Evaluation of the KfW promotional programmes for renewable energy

The KfW Group offers low-interest loans for investments in the utilisation of renewable energy sources. Its funding activity makes an important contribution to achieving the corresponding expansion targets of the German Federal Government. Since 2008, the Systems Analysis department annually reviews the effectiveness of these funding activities. To this end, the resulting saved amounts of fossil fuels, energy imports, greenhouse gas emissions and external costs as well as the resulting effects on employment are determined. For the first time, effects on funded systems located abroad were reviewed for 2013 and 2014. In part, the determined effects form the basis of international reporting for KfW Green Bonds, through which one of the KfW loan programmes is refinanced.

In 2013 and 2014, 42.3% and 33.5% respectively of all investments made in Germany in the expansion of renewable energy for electricity and heat production were financed by KfW programmes (excluding offshore wind turbines). Every year, the systems funded in Germany obviate imports to the value of approximately 520 million euros, emissions of around 9.5 million tonnes of CO<sub>2</sub> equivalents and about 950 million euros in external costs arising from damages to the environment and health. Through this production and the construction of subsidised systems, about 115,000 jobs were secured or created in Germany for one year, and the operation and maintenance of the systems secure work for 3,900 more people for 20 years.

// Dr. Peter Bickel  
E-mail: peter.bickel@zsw-bw.de  
Phone: +49(0)711 78 70-244



## // „Leitstern Energieeffizienz“ Baden-Württemberg

„Guiding Star in Energy Efficiency“ in Baden-Württemberg

Foto: KD Busch – Studio für professionelle Fotografie



## // Erneuerbare Energien in Chile

Renewable energy in Chile

### // „Leitstern Energieeffizienz“ Baden-Württemberg

Zur Steigerung der Energieeffizienz in den Stadt- und Landkreisen initiierte die Landesregierung im Jahr 2014 den Wettbewerb „Leitstern Energieeffizienz“, den das ZSW entwickelt und erfolgreich umgesetzt hat – im Jahr 2015 bereits zum zweiten Mal. Das ZSW hat hierzu ein umfassendes Indikatorensystem ausgearbeitet. Mit diesem lassen sich die Aktivitäten, die die Kreise derzeit im Bereich Energieeffizienz unternehmen, sowie die Erfolge, die bereits zu beobachten sind, bewerten. Während sich der Leitstern im Jahr 2014 vorrangig auf den Wärmesektor konzentrierte, wurde im Jahr 2015 zusätzlich der Strombereich umfassend betrachtet. Auch 2016 wird ein Wettbewerb stattfinden, für den Indikatoren zur effizienten Mobilität entwickelt werden. Ein weiteres wichtiges Ziel des Leitsterns ist es, erfolgreiche und innovative Ideen, Projekte und Strategien unter den Kreisen im Sinne eines Voneinander-Lernens auszutauschen. Dies erfolgte 2015 über zwei begleitende Workshops, die bei den Kreisen eine sehr positive Resonanz fanden. Darüber hinaus zeigen die transparent dargestellten und individuell aufbereiteten Wettbewerbsergebnisse Stärken und Schwächen der jeweiligen Kreise auf und geben somit eine Hilfestellung zur Einordnung der eigenen Ergebnisse.

Preisträger des „Leitsterns Energieeffizienz“ 2015 sind die Landkreise Böblingen, Rems-Murr-Kreis und Zollernalbkreis (Plätze 1 bis 3). Der Landkreis Tuttlingen wurde für seine Fortschritte als „Bester Aufsteiger“ prämiert. Sonderpreise für besondere Aktivitäten erhielten die Stadtkreise Karlsruhe und Heidelberg sowie der Rems-Murr-Kreis. Die Wettbewerbsergebnisse sind unter [www.leitstern-energieeffizienz-bw.de](http://www.leitstern-energieeffizienz-bw.de) dokumentiert.

### // „Guiding Star in Energy Efficiency“ in Baden-Württemberg

In order to increase energy efficiency in urban and rural districts, the federal state government launched the competition “Guiding Star in Energy Efficiency” in 2014, which was successfully developed and realised by ZSW – for the second time in 2015. ZSW developed a comprehensive system of indicators, with which they can evaluate activities that are currently being carried out by the districts in the area of energy efficiency, along with any resulting successes as they become evident. While “Guiding Star in Energy Efficiency” mostly focused on the heating sector in 2014, the electricity sector was also considered comprehensively in 2015. 2016 will also see the start of a competition in which indicators of efficient mobility will be developed. Another important Leitstern objective is mutual learning, a district-wise exchange of successful and innovative ideas, projects and strategies. This was done in 2015 via two accompanying workshops, which enjoyed a favourable response from the districts. The competition results, transparently and individually prepared, highlight the strengths and weaknesses of the individual districts, thereby helping them put their results into context.

The three prize winners of the “Guiding Star in Energy Efficiency” 2015 award were the districts of Böblingen, Rems-Murr-Kreis and Zollernalbkreis (ranked 1 to 3). The Tuttlingen district was awarded for its progress as “Best Improver”. Special prizes for exceptional activities went to the urban districts of Karlsruhe, Heidelberg and Rems-Murr-Kreis. Records of the competition results are available at [www.leitstern-energieeffizienz-bw.de](http://www.leitstern-energieeffizienz-bw.de).

### // Erneuerbare Energien in Chile

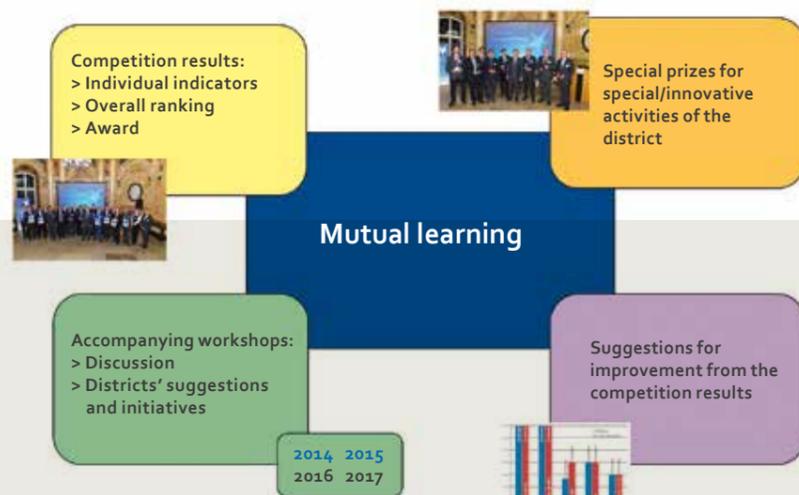
Für den aktuell sehr dynamischen Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) in Chile wird die genaue Vorhersage der Wind- und Photovoltaik-Einspeisung immer wichtiger. Gerade im dünn besiedelten Norden Chiles bestehen gute Voraussetzungen für die energetische (Teil-)Autonomie einzelner Industrieanlagen bis hin zu ganzen Regionen. Deren wirtschaftliche Darstellbarkeit will das ZSW in einer konkreten Machbarkeitsstudie herausarbeiten. Dazu werden Experten des Fachgebiets Systemanalyse einen bestehenden Windleistungsvorhersage-Prototyp zusammen mit einer neu zu entwickelnden Solarleistungsprognose zu einem operationellen System ausbauen.

Hierfür steht die am ZSW entwickelte EE-Vorhersage für Deutschland zur Verfügung, die derzeit im Rahmen diverser Projekte weiter verbessert wird. Mit Hilfe mehrerer Wettermodelle und Messdaten in Kombination mit modernsten Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens entsteht in Zusammenarbeit mit dem chilenischen Partner Universidad de La Serena ein speziell auf die dortige Geographie und Meteorologie zugeschnittenes Mittelfrist-Prognosesystem. Dessen Nützlichkeit beschränkt sich nicht nur auf die Vorhersage der Einspeisung für die Netzsteuerung und Handelszwecke oder zukünftig anstehende Regulierungen des Stromnetzes. Es findet auch zur Verbesserung der (teil-)autonomen EE-Versorgung eines ausgewählten Teilnetzes im Norden Chiles Verwendung. Dazu kommt das Hybridkraftwerk-Simulations- und -Optimierungsmodell P<sup>2</sup>IONEER des ZSW zum Einsatz, mit dessen Hilfe ein optimaler Mix von EE-Quellen unter Berücksichtigung von fossilen Bestandskraftwerken, Übertragungskapazitäten und Energiespeichern ermittelt werden kann. Ziel der Studie ist es, eine Signalwirkung für den gesamten EE-Ausbau in Chile zu erreichen.

### // Renewable energy in Chile

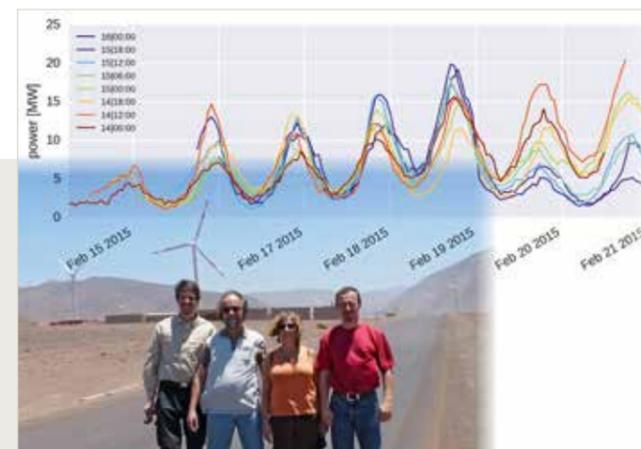
With the current highly dynamic development of renewable energy sources (RES) in Chile, an accurate prediction of feed-in from wind turbines and photovoltaic systems is becoming increasingly important. Especially in sparsely populated northern Chile, there are good preconditions for (partial) energy autonomy of individual industrial plants and even entire regions. ZSW aim to work on economic viability of these conditions as part of a specific feasibility study. Experts of the Systems Analysis department will expand an existing wind power forecast prototype together with a newly developed solar power forecast to form one operational system.

For this purpose, a RES forecast for Germany developed by ZSW is available, which is currently being further improved in the framework of various projects. A medium-term forecasting system adapted to the local geography and meteorology is being realised in cooperation with the Chilean partner Universidad de La Serena using several weather models and measurement data, combined with advanced methods from the field of machine learning. Its usefulness is not limited to the prediction of feed-in for grid control and trading purposes or future upcoming regulations of the electricity grid. It is also being applied to improve the (semi-) autonomous RES supply of a selected sub-grid in northern Chile. The hybrid power plant simulation and optimisation model P<sup>2</sup>IONEER developed by ZSW is being used as well, which allows for the determination of an optimal mix of renewable energy sources taking into account the fossil-fuel power station pool, transmission capacities and energy storage systems. The aim of the study is to achieve a signalling effect for the expansion of RES in Chile.



// Der Aspekt Voneinander-Lernen steht beim „Leitstern Energieeffizienz“ im Vordergrund.  
 // The aspect of mutual learning took centre stage in “Guiding Star in Energy Efficiency”.

// **Andreas Püttner**  
 E-mail: [andreas.puettner@zsw-bw.de](mailto:andreas.puettner@zsw-bw.de)  
 Phone: +49(0)711 7870-268



// Das Projektteam beim Ortstermin sowie ein Vorhersage-Prototyp für einen chilenischen Windpark.  
 // The project team during an on-site visit and a forecast prototype for a Chilean wind farm.

// **Dr. Martin Felder**  
 E-mail: [martin.felder@zsw-bw.de](mailto:martin.felder@zsw-bw.de)  
 Phone: +49(0)711 78 70-284

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

### // 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 mit den höchsten Wirkungsgraden aller Dünnschicht-Technologien in der industriellen Produktion bewährt.

Das CIGS-Technikum des ZSW umfasst alle Maschinen und Anlagen für die Herstellung von Dünnschicht-Solarmodulen – von der Vorbereitung der Glassubstrate bis hin zur Befestigung der Anschlusskabel am fertigen Modul. Die Anlagen sind anders als in einem typischen Laborbetrieb weitgehend für Durchlaufprozesse und damit sehr nah an industriellen Verfahren ausgelegt (Arbeitsgruppe FACIS). Hier werden aktuell insbesondere im Rahmen des BMWi-geförderten Vorhabens CISProTec sowohl verbesserte als auch neue Prozesse für den Transfer in die Industrie erarbeitet.

Der Einsatz von flexiblen Substratmaterialien wie Polymer- oder Metallfolien anstelle des heute dominierenden Glassubstrats wird in einem zweiten Technikum für eine Rolle-zu-Rolle-Beschichtung erarbeitet. Die Herstellung und Optimierung dieser flexiblen CIGS-Module ist Schwerpunktthema der Arbeitsgruppe FLEXIS.

Kostengünstige Drucktechnologien werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme wie Kesterite und Perowskite in einem eigenen Labor weiterentwickelt (Arbeitsgruppe NEMA).

Die langjährigen Erfahrungen des MAT-Teams in der Entwicklung von CIGS-Solarmodulen fließen in Dienstleistungen für die Industrie ein: Im Kundenauftrag übernehmen wir vielfältige Analytikaufgaben (z. B. hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse), die Abscheidung von elektrischen Kontaktschichten sowie die Charakterisierung von Zellen und Modulen.



*„CIGS-Dünnschicht-Solarmodule haben das höchste Wirkungsgradpotenzial aller Dünnschicht-Technologien. Wir unterstützen unsere Partner mit verbesserten Prozessen für noch kostengünstigere und wettbewerbsfähigere Produkte und forschen an der nächsten Generation hocheffizienter PV-Materialien.“*

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

### // Our main focus

The use of thin-film technologies offers considerable potential for reducing the costs of photovoltaic modules. Boasting the greatest efficiency of all thin-film solar cells, the technology based on copper, indium, gallium and selenium (CIGS) has proved to be particularly suitable for industrial production.

The CIGS technical lab at ZSW includes all the machines and systems necessary for producing thin-film solar modules, from the preparation of glass substrates to the attachment of connection cables to the finished module. In contrast to typical laboratory operations, the systems are largely engineered for throughput processes and hence closely mirror industrial processes (FACIS working group). In the context of the BMWi-funded CISProTec project, both new and improved processes are currently being developed for transfer to the industrial sector.

The use of flexible substrate materials, such as polymer and metal films, as opposed to the glass substrates predominantly used today is being developed in a second technical centre for roll-to-roll coating. The manufacture and optimisation of these flexible CIGS modules form the focus of the FLEXIS working group.

A dedicated laboratory is developing cost-effective print technologies for new organic and inorganic semiconductor systems, such as kesterite and perovskite (NEMA working group).

The MAT team's long-standing experience in developing CIGS thin-film solar modules is also being leveraged for industrial services: in response to customer orders, we provide various analytical support services (e.g. high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis) and the deposition of electrical contact layers as well as electrical and optical characterisation of cells and modules.

*“CIGS thin-film solar modules have the highest efficiency potential of all thin-film technologies. We develop improved processes for our partners that allow them to raise the cost-efficiency and competitiveness of their products. We are also conducting research into the next generation of highly efficient PV materials.”*

## // Auf der Jagd nach der Superzelle

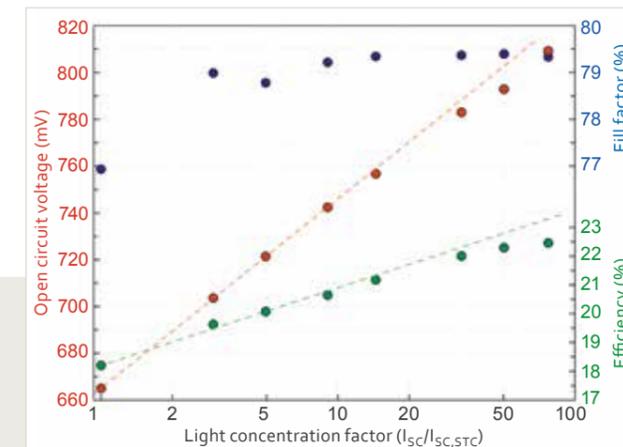
On the trail of the super cell

### // Europäisches Projekt Sharc25 zielt auf 25 % Wirkungsgrad bei Dünnschicht-Solarzellen

Ziel des europäischen Forschungsprojekts „Sharc25“ ist die Entwicklung einer extrem effizienten CIGS-Dünnschicht-Solarzelle für kostengünstige Solarmodule. Angepeilt werden Wirkungsgrade von bis zu 25 % für im Koverdampfungsverfahren hergestellte CIGS-Dünnschicht-Solarzellen – rund 3 Prozentpunkte mehr als bisher (s. Abb. unten rechts). Dazu verfolgen mehrere Forschungsinstitute, Universitäten und Unternehmen aus acht verschiedenen Ländern drei Strategien: ein verbessertes Absorbermaterial, neue Konzepte für effizientere Ober- und Grenzflächen sowie ein optimiertes Lichtmanagement. Das ZSW koordiniert das Forschungsvorhaben im EU-Forschungsrahmenprogramm „Horizon 2020“ mit einem Gesamtvolumen von knapp 6,2 Mio. Euro.

### // Mikrosolarzellen für die kostengünstige Herstellung hocheffizienter Solarmodule

Im Rahmen des EU-Projekts CHEETAH untersucht das ZSW die Eignung von CIGS-Mikrosolarzellen für den Einsatz unter gering bis mittel konzentrierter Einstrahlung wie beispielsweise in Modulen mit integrierten Mikrolinsen. Solche Konzepte versprechen nicht nur höhere Effizienzen als direkte Folge der Lichtkonzentration, sondern auch Einsparungen an Halbleitermaterial, wenn mit Hilfe von Drucktechniken oder anderen Verfahren solche Mikrozellen gezielt erzeugt werden. Zunächst wird jedoch der Ansatz verfolgt, Zellen mit Abmessungen im Millimeterbereich und darunter aus großflächig abgeschiedenen Standardzellen herauszupräparieren und die dabei auftretenden Probleme – unzureichende Kantenisolation und Verluste durch Serienwiderstände – zu lösen.



// Kenndaten einer Mikrozeile mit einer beleuchteten Fläche von 0,15 mm<sup>2</sup> für Beleuchtungsstärken von bis zu 75 Sonnen.  
// Specifications of a micro cell with a lighted surface of 0.15 mm<sup>2</sup> for luminance intensities of up to 75 suns.

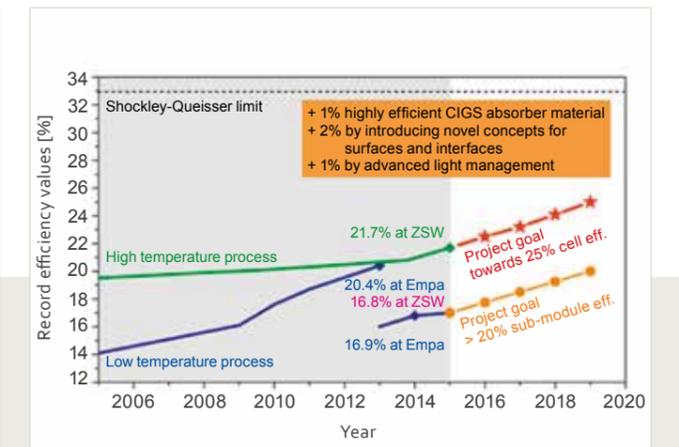


### // European Sharc25 project aims for 25% efficiency in thin-film solar cells

The European 'Sharc25' research project aims to develop an extremely efficient CIGS thin-film solar cell for assembly in cost-efficient solar modules. Target efficiency grades range up to 25% for CIGS thin-film solar cells produced with the co-evaporation method – around 3 percentage points higher than currently feasible (see fig. below right). To achieve this aim, several research institutions, universities and companies from eight different countries are pursuing three different strategies: improved absorber material, new concepts increasing the efficiency of surfaces and boundaries and optimised light management. ZSW is coordinating the research project in the context of the 'Horizon 2020' EU Framework Programme with a total volume of just under € 6.2 million.

### // Micro solar cells for the cost-effective manufacture of highly efficient solar modules

In the context of the EU's CHEETAH project, ZSW is researching the suitability of CIGS micro solar cells for use in low to medium-concentrated irradiation conditions, for instance in modules with integrated micro lenses. Such concepts promise both higher efficiency as a direct consequence of the degree of light concentration and savings in the field of semiconductor material if the respective micro cells are specifically manufactured with the help of print technologies or other methods. For a start, the project has adopted an approach involving preparing cells with dimensions in the mm range and below, from large-scale deposited standard cells and solving associated problems, such as insufficient edge insulation or losses arising from series resistance.



// Die Ziele des europäischen Forschungsprojekts Sharc25.  
// Aims of the European Sharc25 research project.

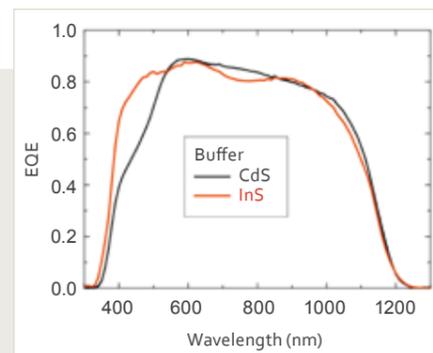
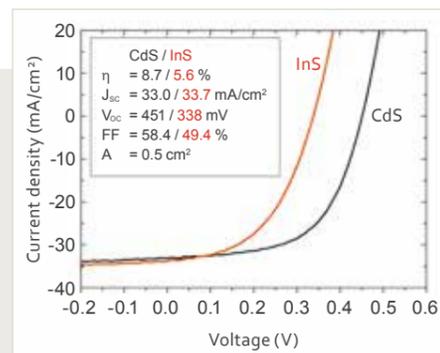
## // R2R-Beschichtung flexibler Solarzellen im All-in-one-Verfahren

R2R coating of flexible solar cells using the all-in-one process

### // EU-Projekt R2R-CIGS erfolgreich abgeschlossen

Im Jahr 2015 wurde das EU-Projekt "Roll-to-roll manufacturing of high efficiency and low cost flexible CIGS solar modules" (kurz „R2R-CIGS“) nach dreieinhalbjähriger Laufzeit beendet. In dem vom niederländischen Forschungsinstitut TNO koordinierten Verbundprojekt arbeiteten elf Institute und Firmen zusammen, um die flexible Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Technologie (CIGS) auf Polymerfolie (Polyimid) voranzubringen. Dabei standen zwei CIGS-R2R-Anlagen zur Verfügung, in denen der Absorber mittels Koverdampfung bei abgesenkter Folientemperatur (ca. 450 °C) aufgebracht wurde: die Pilotanlage bei einem Schweizer Partner und die integrierte Anlage am ZSW, in der im gleichen Vakuum, d. h. mit gleicher Bandgeschwindigkeit, alle Schichten parallel abgeschieden werden können. Die größten Herausforderungen waren die vakuumfreie Abscheidung transparenter leitfähiger Oxide (TCO), die kadmiumfreie und R2R-kompatible Pufferschicht, die nachgeführte Laserstrukturierung im R2R-Verfahren, das All-in-one-Beschichtungskonzept des ZSW sowie die flexible Modulverkapselung mittels dünner Barrierschichten gegen Feuchtigkeit. Die Funktionalität aller Ansätze konnte erfolgreich unter Beweis gestellt werden.

Das ZSW demonstrierte durch den Einbau einer Indiumsulfid-Verdampferquelle (InS<sub>x</sub>) in die integrierte R2R-Vakuumbeschichtungsanlage und die Inbetriebnahme der Zinkoxid-Beschichtungseinheit einen kompletten Lauf im All-in-one-Verfahren, bei dem gleichzeitig der Molybdän-Rückkontakt, der CIGS-Absorber, die Indiumsulfid-Pufferschicht sowie die Zinkoxid-Fensterschichten aufgebracht wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass funktionierende CIGS-Solarzellen im selben Vakuum hergestellt werden können (s. Grafik unten). Optimierungsbedarf besteht in der Anpassung der einzelnen Schichtabscheidungsparameter an die Bandgeschwindigkeit sowie in Bezug auf die Übergangszonen aufeinander folgender Schichten, die keinerlei Luftsauerstoff (Atmosphäre) ausgesetzt sind.



// Kennlinie (links) und Quantenausbeute (rechts) einer im All-in-one-Verfahren abgeschiedenen Solarzelle im Vergleich zu einer Referenzzelle. Die Messung der externen Quantenausbeute zeigt einen deutlichen Stromgewinn im kurzwelligen Bereich (rote Kurve, rechts).

// Characteristic curve (left) and quantum efficiency (right) of a solar cell deposited according to the all-in-one process compared to a reference cell. Measurement of the external quantum efficiency shows a significant gain in electricity in the short wavelength range (red curve, right).

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

## // Profitieren Kesterite von Natrium-Zugaben?

Do kesterites benefit from the addition of sodium?

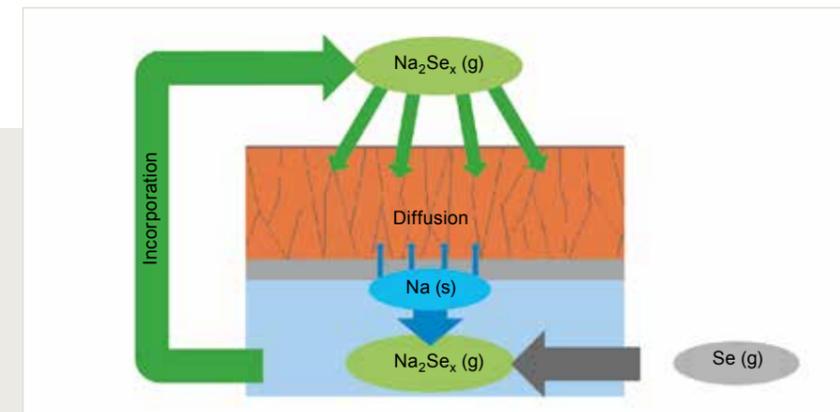
### // Einfluss von Natrium auf lösungsprozessierte Kesterit-Solarzellen

Das Materialsystem Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> (Kesterit) ist dem klassischen Material CIGS sehr ähnlich, kommt aber mit den kostengünstigen und nachhaltig verfügbaren Elementen Zink und Zinn aus.

Eine wichtige Frage ist, ob ähnlich wie bei CIGS das Natrium (Na), das aus dem Glas ausdiffundiert oder bewusst zugeführt wird, einen ausschlaggebenden Einfluss auf die Solarzeleigenschaften hat. In einer aktuellen Studie wurden am ZSW Proben unter Na-freien Bedingungen präpariert und gezielt unterschiedliche Mengen an Na bei verschiedenen Prozess-Schritten beigegeben. Dabei durchlaufen die Proben einen Heizschritt in Selen-Atmosphäre (Selenisierung).

Im Ergebnis ist der Einfluss von Na auf den Kesterit-Prozess weniger stark ausgeprägt als bei CIGS. Auch mit komplett Na-freien Proben können Wirkungsgrade von etwa 5 % erzielt werden, sie erhöhen sich aber durch gezielte Zugabe von Na. Insbesondere die Leerlaufspannung kann dadurch deutlich gesteigert werden, weil Na die elektrischen Eigenschaften des Kesterit-Absorbers positiv beeinflussen kann. Die Ausbildung großer kristalliner Körner ist aber nicht zwangsläufig an den Na-Gehalt gekoppelt, wie oft angenommen wird.

Dennoch werden nach wie vor die besten Ergebnisse durch den Standardprozess erzielt, bei dem Na aus dem Substratglas in den Absorber gelangt. Dabei scheint das Natrium nur teilweise durch direkte Diffusion in den Absorber zu kommen; ein entscheidender Teil wird während des Selenierungsprozesses über die Gasphase eingebaut. Dabei geht Na eine gasförmige Verbindung mit dem reaktiven Selen ein und kann daher auch von oben auf die Absorberschicht einwirken.



// Schematische Darstellung des Selenierungsprozesses: Na diffundiert zum Teil direkt in den Absorber, wird aber auch in Form von Natrium-Selen-Verbindungen über die Gasphase eingebaut.

// Diagram of the selenisation process: Na partially diffuses directly into the absorber as well as being incorporated via the gas phase in the form of sodium-selenium compounds.

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

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

## // Beschleunigte Alterung von Photovoltaik-Modulen Accelerated ageing of photovoltaic modules

### // Unsere Kernkompetenzen

Die Qualität und Stabilität von Solarstrom-Modulen (PV-Modulen) sowie der optimierte Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder 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 hochaufgelösten Bestimmung von Degradationseffekten unter Freifeld-Betriebsbedingungen korreliert. Die potenzialinduzierte Leistungsdegradation (PID) wird 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 („Due Diligence“) von PV-Großanlagen und von PV-Produktionsstätten 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, electrical voltage), our consultancy expertise includes (due diligence) inspections of large-scale PV installations and PV production facilities 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 home-owners 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.

### // CIGS-Module im Damp-Heat-Test

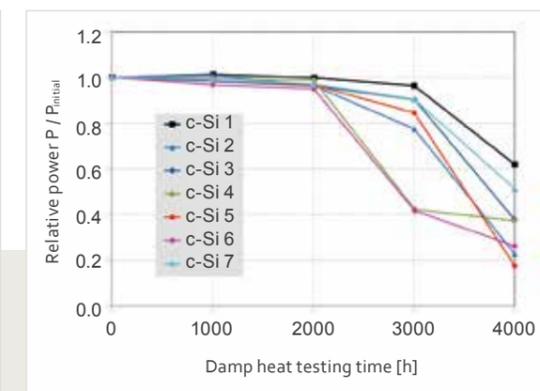
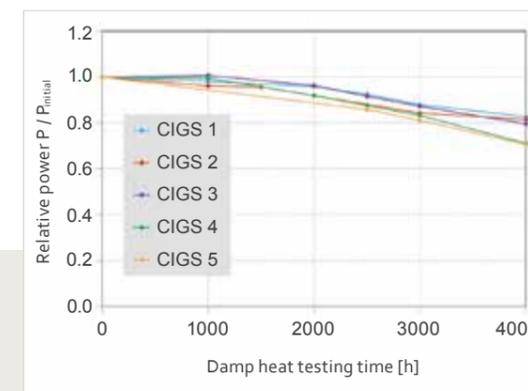
Der Damp-Heat(DH)-Test, der bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit durchgeführt wird, zählt zu den harten Prüfungen für PV-Module im Rahmen der Bauart- und Qualitätzertifizierung (IEC 61646, 61215). Der in Klimakammern über 1.000 h durchgeführte Test stellt gegenüber der Freibewitterung eines PV-Moduls eine stark erhöhte Beanspruchung dar. Damit können alterungsbedingte Fehler des Moduls wie Leistungsabnahme, Delamination der Einkapselmaterialien oder auch Korrosion dünner Schichten in wesentlich kürzerer Zeit hervorgerufen werden.

Eine allgemein gültige Ableitung einer zu erwartenden Modul-lebensdauer aus der DH-Prüfdauer ist zwar nicht möglich, weil hierfür immer sowohl das einwirkende Mikroklima als auch die Temperaturabhängigkeit und Aktivierungsenergie des Fehlermechanismus bekannt sein müssen. Man geht jedoch davon aus, dass mit einem 1.000-h-DH-Test mehrere Jahre bis Jahrzehnte normaler Freibewitterung beschleunigt simuliert werden können. Sowohl für Qualitätsvergleiche als auch für Test-to-Failure-Untersuchungen wird die Prüfdauer über die 1.000 h hinaus deutlich erhöht. In einer Studie wurden CIGS-Module 4.000 h lang im DH-Test beansprucht und zwischendurch regelmäßig die aktuelle Qualität und Performance bestimmt. Bis etwa 2.000 h DH zeigen die CIGS-Module kaum eine Leistungsdegradation, nach 4.000 h erbringen die Module im Schnitt noch 80 % ihrer ursprünglichen Leistung. Das Stabilitätsverhalten der CIGS-Module ist damit besser als das von typischen c-Si-Modulen, die ab 3.000 h DH-Testdauer einen signifikanten Leistungseinbruch zeigen.

### // CIGS modules in damp heat test

The damp heat test (DH), which is carried out at 85°C and 85% relative humidity, is among the more stringent tests PV modules have to undergo in the context of the IEC 61646, 61215 design and quality certification. During the test, which is carried out in climate chambers over a period of 1,000 hours, the PV modules are subjected to much stricter requirements than in outdoor conditions. Ageing-related faults, such as lower performance, delamination of the sealing material or corrosion of thin layers, can thus be caused in much shorter time.

A generally valid estimate of the modules' useful lifetime cannot be derived from the DH test since such deduction requires knowledge of both the respective micro climate and the temperature dependency and activation energy of the fault mechanism. However, it is assumed that the 1,000-hour DH test simulates several years or decades of service in outdoor conditions. For comparative quality analysis and test-to-failure studies, the test duration is extended significantly beyond the 1,000 hours. In one study, CIGS modules were subjected to a 4,000-hour DH test involving regular quality and performance assessments. Up until around 2,000 hours of DH, CIGS modules show very little degradation of performance. After 4,000 hours, their average performance declines to 80%. The stability behaviour of CIGS modules is thus superior to that of typical c-Si modules which show a significant degradation of performance after 3,000 hours of DH testing.



// Relative Leistung in Abhängigkeit der Dauer des DH-Tests von kommerziellen CIGS-Modulen (links) und von c-Si-Modulen (rechts).  
// Relative performance of commercial CIGS modules (left), and c-Si modules (right), as a function of DH test duration.



*„Hausbesitzer, Eigentümergemeinschaften oder Unternehmer investieren mit Photovoltaik-Anlagen in die Zukunft einer emissionsfreien Energieversorgung. Wir kümmern uns um die Stabilität der Module, optimieren Anlagen und deren Betrieb und sichern so ihren wirtschaftlichen Einsatz.“*

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

*“Home-owners, owners’ associations and entrepreneurs who install photovoltaic systems are investing in an emission-free energy future. We, in turn, ensure the stability of the modules and optimise systems and their operation in order to secure their cost-effective use.”*



// Peter Lechner

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



## // Feldtests für Mikrowechselrichter

Field tests of micro inverters

### // Definition und Realisierung von Feldtests für modulnahe Photovoltaik-Leistungskomponenten

Modulnahe und modulintegrierte Leistungskomponenten wie Moduloptimierer oder Modulwechselrichter (Mikroinverter) spielen eine zunehmend größere Rolle im Photovoltaik(PV)-Markt. Sie werden insbesondere als ertragsverbessernde Lösung für Anlagen beworben, die unter partieller Beschattung leiden. Weitere Argumente sind erhöhte Anlagensicherheit durch Abschaltbarkeit der einzelnen Module z. B. im Brandfall, mehr Flexibilität und Auslegungsoptionen und ein vereinfachtes Design einer PV-Anlage für den Installateur sowie die Überwachungsmöglichkeit und Verfügbarkeit von Performancedaten auf Modulebene für den Anlagenbetreiber. Allerdings wird von den modulnahen Elektronikkomponenten im Vergleich zu herkömmlichen Strangwechselrichtern eine höhere Zuverlässigkeit und längere Lebensdauer erwartet, vergleichbar mit der von PV-Modulen. Bei den in Modulnähe auftretenden höheren Betriebstemperaturen stellt das eine anspruchsvolle Herausforderung dar.

Zur realitätsnahen, zeit- und strahlungsaufgelösten Charakterisierung der DC- und AC-Performance derartiger kommerzieller Leistungskomponenten wurde auf dem Solar-Testfeld Widderstall des ZSW eine Testplattform installiert, auf der die zu prüfenden Modulelektroniken (Device under Test, DUT) im direkten Vergleich zu einem Referenzsystem mit Strangwechselrichter untersucht werden können. Dabei können verschiedene Verschattungsmodi realisiert werden, wobei jeweils DUT und Referenzsystem identisch verschattet werden. Um systembedingte Unterschiede der Testaufbauten und den Bias der Messkomponenten zu reduzieren und damit die Messgenauigkeit zu verbessern, können dabei sowohl das DUT- und das Referenzmesssystem als auch die PV-Module periodisch alterniert werden.



// Gleichförmige Beschattung des DUT- und des Referenzsystems mit Giebelschablonen.  
// Uniform shading of the DUT and reference systems using gable moulds.

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

// Modulnahe Elektronik im Feldtest.  
// Field test of module-level power electronics.

### // Definition and implementation of field tests for photovoltaic module-level power electronics

Performance components at module-level, such as module optimisers or module inverters (micro inverters), are playing an increasingly important role on the photovoltaics (PV) market. They are specifically advertised as solutions for improving the yield of systems suffering from partial shading. Further arguments brought in their favour are increased system security via the option to switch off individual modules in the event of a fire, greater flexibility and various design options including simplified PV system design for installers, and availability and monitoring of module-level performance data for system operators. However, module-level power electronics are expected to be more reliable and have a longer useful lifetime than conventional string converters, i.e. comparable to that of PV modules – quite a challenge given the higher operational temperatures occurring on module level.

A test platform has been installed at ZSW's Widderstall solar test facility to arrive at a near-realistic, time- and irradiation-resolved characterisation of the DC and AC performance of such commercial performance components, which allows for the testing of the respective module electronics (device under test, DUT) in direct comparison to a reference system involving string inverters. Various shading modes can be realised in this context, with DUT and reference systems always being subjected to identical shading conditions. In order to reduce system-related differences in the test arrangements and reduce the bias in the measurement components with the aim of improving measurement accuracy, both the DUT and reference measuring system and the PV modules may be alternated on an intermittent basis.



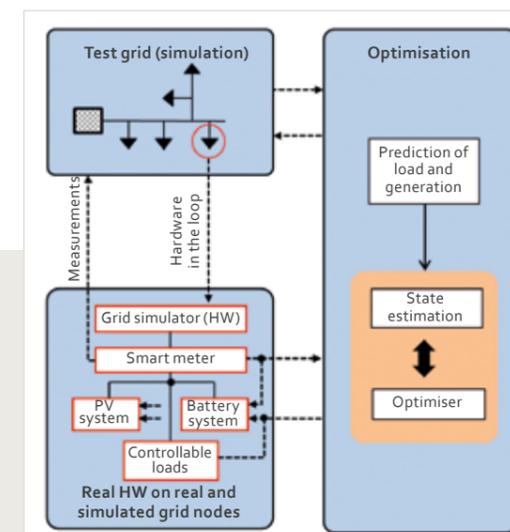
## // Optimierte Nutzung von erneuerbaren Energien

Optimised use of renewable energy

### // Netz- und systemdienlicher Betrieb von Erzeugern, Lasten und Speichern

Eine erhöhte Prognosegenauigkeit für die Stromerzeugung aus Sonne und Wind einerseits und der Last andererseits erlaubt es, den Bedarf an Speicherkapazität und Lastverschiebung vorauszuberechnen, insgesamt zu minimieren und optimal einzusetzen. Das Ziel ist eine ausgeglichene Bilanz aus Erzeugung und Last zu jeder Zeit. Große Lastverschiebepotenziale ergeben sich bei der Kopplung der Sektoren Strom und Wärme über Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Wärmepumpen. Angesichts der Vielzahl von Optionen ergibt sich die Frage nach der Optimierung des Betriebs von Erzeugern, Lasten und Speichern aus Sicht des Nutzers und des Energieversorgers bzw. Netzbetreibers. In verschiedenen Projekten zur optimierten Steuerung von PV-Anlagen, Wärmepumpen und elektrischen Speichern in Wohnhäusern, zu urbanen Energiesystemen im Allgemeinen und zum prädiktiven Netzbetrieb bei hohen Anteilen an Solarstrom werden hierzu Verfahren entwickelt. So wurde in Simulationen gezeigt, dass mit modellprädiktiver Steuerung von Wärmepumpen und Speichern ein hoher Eigenverbrauch von lokal erzeugtem Sonnenstrom erhalten werden kann, auch wenn dem Verbraucher zeitweise die Nutzung von Windstrom vom Energieversorger vorgegeben wird.

In enger Zusammenarbeit verschiedener Fachgebiete am ZSW mit externen Partnern entstehen dabei im Rahmen von BMUB- und BMWi-geförderten Vorhaben (PVSYS-NS, EnVisaGe und Grid-Predict) sowohl theoretische Modelle und Berechnungswerkzeuge als auch praktische Umsetzungen im Labor (s. Grafik unten) und im Feldtest.



// Simulator gekoppelt an reale Hardware (HW) zur Nachbildung und Optimierung des intelligenten Betriebs dezentraler Erzeuger, Speicher und Lasten.  
// Simulator linked to real hardware (HW) serving to represent and optimise smart operation of decentralised generators, storage systems and loads.

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

// Beispiel für eine Gemeinde mit hohem Einsatz von PV-Anlagen und entsprechenden Ansprüchen an das Netz.  
// Example of a municipality with extensive use of PV systems and respective grid requirements.

### // Grid- and system-serving operation of generators, loads and storage systems

Increased accuracy of forecasts of solar and wind power generation on the one hand and loads on the other allow for pre-calculation, overall minimisation and optimum assignment of the demand for storage capacities and load shifting. The aim is an even balance between generation and load at all times. Significant load shift potential arises in the context of heat and power co-generation via CHP systems and heat pumps. Given the large number of available options, the question arises how to optimise the operation of generators, loads and storage systems from the perspective of the user, the utility and the grid operator. Respective processes are currently being developed in the context of various projects relating to optimised control of PV systems, heat pumps and electric storage systems in residential buildings, urban energy systems in general and predictive grid operation involving a high percentage of solar power. Simulation has shown that model-predictive control of heat pumps and storage systems can maintain a high level of self-consumption on the basis of locally generated solar power even if the utilities intermittently require the consumer to use wind energy.

In the context of BMUB and BMWi-funded projects (PVSYS-NS, EnVisaGe and Grid-Predict), various ZSW research departments are working closely with external partners on the development of theoretical models and calculation tools as well as practical implementation approaches in laboratories (see chart below) and field tests.

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

## // ZSW-Wirbelschichtmaterial ZSW fluidised bed material

### // Unsere Kernkompetenzen

Leitmotiv des Fachgebietes Regenerative Energieträger und Verfahren ist die Erzeugung regenerativer Brenn- und Kraftstoffe. Unsere Kernkompetenzen sind:

- > Erneuerbare Energie effizient in leicht transportable, „tankbare“ chemische Energieträger zu überführen und zu speichern.
- > Erneuerbare Energieträger über die Erzeugung von Wasserstoff bzw. wasserstoffreichen Gasen hocheffizient zu verstromen.

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

Es wurden bereits zwei Power-to-Gas (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, der Inbetriebnahme sowie des Anlagenmonitorings beteiligt.

### REG-Schwerpunkthemen sind:

- > Power-to-Gas (P2G<sup>®</sup>)
- > Biomass-to-Fuel
- > Elektrolyse
- > Reformierung/Gaskonditionierung

### // Our main focus

The guiding theme of the department of Renewable Fuels and Processes is the production of renewable fuels and motor fuels. Our main focus points are:

- > to efficiently convert renewable energy into an easily transportable, storable, and fuel-like chemical energy carrier
- > to generate electricity with high efficiency using hydrogen or hydrogen-rich gas produced from renewable energy carriers.

The REG research department develops and tests new technologies for the production of syngas, hydrogen and substitute natural gas (SNG) in a technical scale of several hundred kW. In addition to electrolysis, fuel reforming and the production of syngas using biomass and electricity, our activities are focused on gas cleaning and conditioning, and fuel synthesis. The objective in the area of electrolysis is cost reduction for the entire hydrogen generation system through modularisation of system components and further development of the electrolysis unit. The gas processing objectives are to produce a suitable gas for fuel cells, a fuel gas for electricity generation, a conditioned syngas for fuel production and a substitute natural gas to be distributed via the natural gas grid.

Two Power-to-Gas (P2G<sup>®</sup>) plants at ZSW have already been built in the power classes of 25 kW<sub>el</sub> and 250 kW<sub>el</sub>. ZSW were involved in basic engineering, commissioning and plant monitoring for another plant with 6,000 kW<sub>el</sub>.

### REG focuses on:

- > Power-to-Gas (P2G<sup>®</sup>)
- > Biomass-to-fuel
- > Electrolysis
- > Reformation/gas conditioning

### // Erprobung von kalksteinbasiertem ZSW-Wirbelschichtmaterial im MW-Maßstab

Für die Erzeugung von Strom und Wärme aus fester Biomasse eignet sich die kombinierte Verbrennung und Vergasung im Zweibett-Wirbelschichtprozess. Dabei wird ein Brenngas erzeugt, das im Gasmotor verstromt wird. Allerdings haben die wenigen bereits existierenden Anlagen oft wirtschaftliche Probleme aufgrund von Störfällen (z. B. unzureichende Produktgasqualität, Ablagerungen) und/oder hoher Betriebskosten (z. B. teures Wirbelschichtmaterial, Nutzung von hochwertigem Stammholz). Die Verwendung von abriebfestem und reaktivem Kalkstein als Wirbelschichtmaterial kann diese Probleme lösen, wie experimentelle Untersuchungen des ZSW gezeigt haben. Durch den Einsatz von Kalksteinen kann nicht nur die Gasqualität verbessert werden (z. B. weniger Störstoffe), sondern auch die Verwendung mineralstoffreicher biogener Reststoffe ermöglicht werden.

Im Rahmen des AiF-Projektes „Entwicklung eines kalksteinbasierten Wirbelschichtbettmaterials zur Nutzung biogener Reststoffe bei der Biomasseverbrennung und -vergasung“ wird erstmals ein vom ZSW auf Eignung geprüfter und empfohlener Kalkstein als Wirbelschichtmaterial in einer kommerziellen 6-MW<sub>th</sub>-Zweibett-Wirbelschichtanlage erprobt.

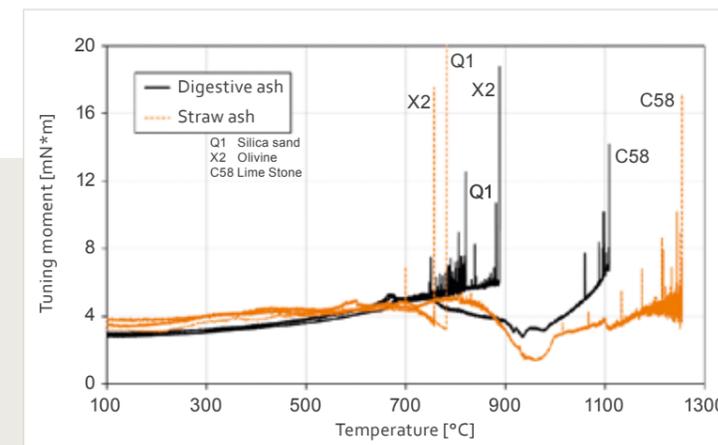
Nach Adaption der Anlagentechnik liegt der Kalksteinverbrauch bei ca. 100 kg pro Tonne trockenes Holz. Das entspricht Kosten frei Anlage von unter 4 Euro pro Tonne Holz. Die hohe Abriebfestigkeit ist eine wichtige Voraussetzung für einen sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetrieb. Die katalytischen Eigenschaften des Wirbelschichtmaterials resultieren in einer Verbesserung der Ausbeute, Reinheit und Qualität des Brenngases sowie in einer Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit.

### // Testing limestone-based ZSW fluidised bed material in the MW scale

Combined combustion and gasification with two interconnected fluidised beds is suitable to generate electricity and heat using solid biomass. A fuel gas is produced that is converted into electricity in gas engines. However, the few already existing plants often suffer from economic problems due to accidents (for example, inadequate product quality gas, deposits) and/or high operating costs (for example, expensive fluidised bed material, use of high-quality stem wood). The use of reactive limestone with high mechanical stability as a fluidised bed material can solve these problems, as shown in experiments conducted by ZSW. Not only can the gas quality be improved by using limestone (for example, fewer impurities), but also mineral-rich biogenic residues can be used.

For the first time and as part of the AiF project “Development of a limestone-based fluidised bed material for the use of biogenic residues in biomass combustion and gasification” a limestone source checked as to its suitability and recommended by ZSW is being tested as a fluidised bed material in a commercial 6 MW<sub>th</sub> dual fluidised bed system.

Following an adaptation of plant technology, limestone consumption is at about 100 kg per tonne of dry wood. This corresponds to costs, excluding plant costs, of less than four euros per tonne of dry wood. A high attrition resistance is an important requirement for safe and efficient plant operation. The catalytic properties of the fluidised bed material result in an improved yield, purity and quality of the fuel gas, and an improved plant availability.



// Rheologische Untersuchung an einem Rotationsviskosimeter-Teststand des ZSW zum Agglomerationsverhalten von verschiedenen Wirbelschichtmaterialien mit Aschen aus mineralstoffreichen biogenen Reststoffen. Eine Agglomeration setzt ein, wenn das Drehmoment des Rotationsviskosimeters sprunghaft ansteigt.

// Rheological test using a rotational viscometer test rig ZSW has to determine the agglomeration behaviour of different fluidised materials with ashes from mineral-rich biogenic residues. Agglomeration starts when the torque of the rotational viscometer increases abruptly.



„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 eFuels.”



## // Alkalische Druckelektrolyse für P<sub>2</sub>G®-Anwendungen

Alkaline pressure electrolysis for P<sub>2</sub>G® applications

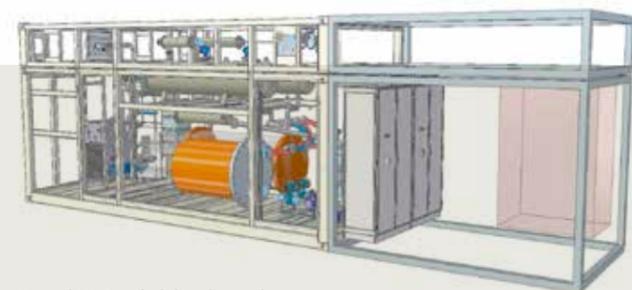
### // Alkalische Druckelektrolyse für P<sub>2</sub>G®-Anwendungen

Seit 2013 arbeitet das Fachgebiet REG an der Entwicklung einer innovativen Alkalischen Druck-Elektrolyse (AEL) für Power-to-Gas-(P<sub>2</sub>G®)Anwendungen im Rahmen des vom BMWi geförderten Verbundprojekts „P<sub>2</sub>G®-Elektrolyse“. 2015 konnten in drei Kernarbeitsbereichen des Projekts wichtige Ergebnisse erzielt werden.

Das neue ZSW-Elektrolyseblockkonzept konnte erfolgreich mit einem 200-cm<sup>2</sup>-Elektrolyseblock mit fünf Zellen getestet werden. Die Auslegung bezüglich Dichtigkeit, Materialauswahl und Funktion wurde mit den Versuchen bestätigt. Die guten Ergebnisse wurden in den 3.000-cm<sup>2</sup>-Maßstab hochskaliert. Ein neues hocheffizientes SIL2-fähiges Elektrolyse-Gleichrichter-system mit geringsten Netzrückwirkungen und knapp 0,5 MW DC-Ausgangsleistung konnte innerhalb von knapp acht Monaten von der Konzeption bis zur Betriebsfähigkeit in der neuen ZSW-Druckelektrolyse-Technikumsanlage gebracht werden.

Das ZSW-eigene 1-MW-Druckelektrolyse-Anlagenkonzept inklusive des betriebstechnischen Sicherheits- und Steuerungskonzepts wurde 2015 erfolgreich den notwendigen sicherheitstechnischen Prüfungen durch eine unabhängige Prüforganisation unterzogen und die gesamte Anlage mit den Subsystemen im REG-Technikum aufgebaut. Die Anlage wird mit einem 300-kW-ZSW-Elektrolyse-block in Betrieb gehen.

In dem 2014 in Betrieb gegangenen Druckelektrolyse-Systemprüfstand wurden mehrere Messkampagnen mit einem alkalischen Druckelektrolyse-Kurzblock im 0,6-m<sup>2</sup>-Maßstab eines Projektpartners durchgeführt. Neben der Kennlinien- und Betriebsverhaltens-Vermessung des Blocks waren auch Subsystem-Qualifizierungen des Prüfstandes wichtige Arbeitsfelder.



// 300-kW-Druckelektrolyseanlage.  
// 300-kW pressure electrolysis system.

// 200- und 3.000-cm<sup>2</sup>-Zellrahmen im Größenvergleich (Abb. links), Test der Zellrahmenstapelung und Maßhaltigkeit in der Größe 3.000 cm<sup>2</sup> (Abb. Mitte), 500-cm<sup>2</sup>-Elektrodenpackage für den Versuchsbetrieb (Abb. rechts).  
// Size comparison of 200 and 3,000 cm<sup>2</sup> cell frames (left image), testing cell frame stacking and dimensional accuracy in the format of 3,000 cm<sup>2</sup> (centre image) and 500 cm<sup>2</sup> electrode package for trial operation (right image).

### // Alkaline pressure electrolysis for P<sub>2</sub>G® applications

Since 2013, the REG department has been developing an innovative alkaline pressure electrolysis (AEL) method for Power-to-Gas applications within the framework of the joint project "P<sub>2</sub>G® electrolysis" funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. In 2015, some significant results were achieved in three key areas of the project work.

The new ZSW electrolysis block concept was successfully tested with a 200 cm<sup>2</sup> electrolysis block with five cells. The design in terms of leak tightness, material selection and function was experimentally confirmed. The good results were scaled up to the 3,000 cm<sup>2</sup> scale. A new, highly efficient SIL2 compatible electrolysis rectifier system with minimised system perturbations and an output of nearly 0.5 MW DC was successfully brought to operational readiness in ZSW's new technical centre for pressure electrolysis in just under eight months.

In 2015, ZSW's own 1-MW pressure electrolysis system concept including the operational safety and control concept successfully passed the necessary safety technical tests run by an independent certification agency, and the entire system with its subsystems was set up in the REG centre. The system will be operated with a 300-kW electrolysis block from ZSW.

In the test rig for the pressure electrolysis system, put into operation in 2014, several field campaigns were carried out with a project partner's alkaline pressure electrolysis short block on a scale of 0.6 m<sup>2</sup>. In addition to characteristic curve and operational performance measurements of the block, subsystem qualifications of the test rig were further important areas of work.

### // Andreas Brinner

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

## // Markteinführung: ZSW koordiniert Callux-Projekt

Market launch: ZSW coordinate Callux project

### // Vom ZSW koordiniertes Callux-Projekt mündet in Markteinführung

Der im September 2008 begonnene Praxistest „Callux – Brennstoffzellen fürs Eigenheim“ ist in der Markteinführung der innovativen Anlagen gemündet. In den vergangenen sieben Jahren hatten die beteiligten Hersteller von Brennstoffzellen-Heizgeräten gemeinsam mit Unternehmen aus der Energiewirtschaft fast 500 Brennstoffzellen-Heizgeräte installiert, betrieben und messtechnisch begleitet. Das Fachgebiet REG war bei Callux federführend für die Projektkoordination, die wissenschaftliche Begleitung und das Technologie-Monitoring verantwortlich.

Die Effizienz und die Verfügbarkeit der Geräte wurden im Projektverlauf stetig optimiert. In den insgesamt über fünf Millionen Betriebsstunden, umgerechnet ungefähr 570 Jahre, konnte den Anlagen die für die Markteinführung notwendige Langlebigkeit attestiert und ihre Eignung für einen zukünftigen Einsatz in virtuellen Kraftwerken nachgewiesen werden. Die CO<sub>2</sub>-Einsparungen lagen durchschnittlich bei 1,2 t jährlich gegenüber der Brennwertechnik und Strombezug aus dem Netz.

Die Gesellschaft für Konsumforschung konnte im Rahmen von Callux eine weitreichende Akzeptanz für die Anlagen seitens der Kunden und des Handwerks ermitteln. Die positive Reaktion geht auf das Engagement von Callux in der Berufsbildung zurück. Durch die Vernetzung mit Bildungseinrichtungen konnten Fachanwender und -partner rechtzeitig an die Technik mit Brennstoffzellen herangeführt werden.

Den erfolgreichen Abschluss des Projekts haben die Partner zusammen mit den Feldtest-Kunden sowie Vertretern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft am 26. November 2015 im BMVI feierlich begangen.

### // Callux project coordinated by ZSW culminates in market launch

The Callux field trial for home fuel cells that was started in September 2008 led to the launch of these innovative systems. In the past seven years, manufacturers of fuel cell heating systems had jointly installed, operated and monitored nearly 500 fuel cell heating systems. The REG department was largely responsible for project coordination, scientific support and technological monitoring during Callux.

Both efficiency and availability of the systems were optimised continuously throughout the project. After more than five million operational hours, equivalent to about 570 years, it was possible to certify the system longevity required for the market launch, along with its suitability for future use in virtual power plants. CO<sub>2</sub> reductions were on average 1.2 tonnes a year compared to heat supply from gas-condensing appliances and electricity purchase from the grid.

As part of the Callux project, Gesellschaft für Konsumforschung were able to confirm wide acceptance of the equipment by customers and craftsmen alike. The positive feedback is a result of Callux's commitment to vocational training. Thanks to networking with educational institutions, professional users and partners were introduced to the fuel cell technology in good time.

On 26 November 2015, the partners celebrated the successful completion of the project together with field trial customers and representatives from the government, the industry and academia in the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure.

### // Dr. Marc-Simon Löffler

E-mail: marc-simon.loeffler@zsw-bw.de  
Phone: +49(0)711 78 70-233

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

### // Unsere Kernkompetenzen

#### Neue Aktivmaterialien

Der traditionelle Schwerpunkt der Arbeiten von ECM liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren. Kernkompetenz ist die Entwicklung maßgeschneiderter Pulver. 25 Jahre Materialforschung bilden die Basis für unser umfangreiches Verständnis über die Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien (wie z. B. Hochvoltspinelten, Lithiumübergangsmetallphosphaten und -silikaten) und Anodenmaterialien (z. B. optimierten Kohlenstoffmodifikationen, Titanaten 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.

#### Zellfertigungstechnologien

Im Labormaßstab können Prototypen im Format 18650 und gestapelte Pouchzellen für Forschungszwecke hergestellt werden. Ziel ist die Entwicklung angepasster vorindustrieller Fertigungsprozesse für neuartige, leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Zellgenerationen. Bisher gefertigte Zellen mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Zyklenstabilität (> 15.000 Zyklen). Ein Fokus liegt derzeit auf der Prozessierung von Hochenergieelektroden mit wässrigen Bindersystemen und auf der Entwicklung von Zellen mit Hochvoltspinelten.

#### Post-Mortem-Analysen

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

#### New active materials

Our work traditionally focuses on synthesising and characterising functional materials for batteries and supercapacitors with core expertise in 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) and anode materials (such 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.

#### Cell production technologies

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 (>15,000 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.

#### Post-mortem analyses

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

## // Entwicklung von Aktivmaterialien

### Development of active materials

### // Neue Materialien für Lithium-Ionen-Zellen: Leistung steigern – Verfügbarkeit absichern

Schlüsselparameter für eine breite Akzeptanz der Elektromobilität ist die Weiterentwicklung von Hochenergiebatterien in Bezug auf höhere Energiedichte, Zuverlässigkeit und Kostenreduktion. Die Kosten werden signifikant durch die Aktivmaterialien bestimmt. In dem vom BMBF im Rahmen der ExcellentBattery-Initiative geförderten Projekt LiEcoSafe gelang es dem ZSW, kostengünstige Alternativen für das Kathoden- und das Anodenmaterial zu entwickeln.

Das neue Kathodenmaterial mit der Formel  $\text{Li}_{1.5+x}\text{Mn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$  ( $0 < x < 0.5$ ) verzichtet auf das teure und wenig verfügbare Kobalt und enthält deutlich weniger Nickel als kommerzielle Materialien. Es besitzt mit mehr als 210 mAh/g eine größere Speicherkapazität als heute verwendete Kathodenmaterialien. Mit über 4,5 V Entladungsspannung ist eine signifikant höhere Energiedichte der Zelle erreichbar (s. Abb. unten). Weitere Vorteile sind die hohe thermische Stabilität im geladenen Zustand, die trotz der hohen Energiedichte zu einer höheren Sicherheit führt, und die einfach hochskalierbare Herstellung über bekannte Syntheseverfahren. Erste vorläufige Tests in Vollzellen mit Grafitanoden lieferten gute Performance-daten und zeigten eine gute Zyklenstabilität.

Auf der Anodenseite wird Naturgraphit verwendet, der durch Rundungsprozesse veredelt wird (s. Abb. oben). Dabei fallen große Mengen von Abfallprodukten an. Dieser Veredlungsprozess konnte im Labormaßstab erfolgreich nachgestellt werden. Ansätze zur Steigerung der Ausbeute des Rundungsprozesses und damit zu einer verbesserten Wertschöpfung wurden erfolgreich identifiziert. Darüber hinaus konnten auch die Grafitabfallprodukte für Batterieanwendungen tauglich gemacht werden.

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

### // New materials for lithium-ion cells: boost performance – ensure availability

Key parameters for the popular acceptance of electromobility are improving the energy density, reliability and costs of high-energy batteries. The cost of the battery is significantly impacted by the active materials used. As an outcome of the LiEcoSafe project supported by BMBF as part of the ExcellentBattery initiative, ZSW succeeded in developing cost-effective alternative cathode and anode materials for lithium-ion batteries.

The new cathode material with the formula  $\text{Li}_{1.5+x}\text{Mn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$  ( $0 < x < 0.5$ ) does not require expensive and scarce materials such as cobalt and contains far less nickel than commercial materials. With over 210 mAh/g the storage capacity is larger than cathode materials used today. A discharge voltage of over 4.5 V allows a significantly higher energy density to be achieved for the cell (see fig. below). Further advantages include high thermal stability when charged and improved safety characteristics despite the high energy density. The material can be easily scaled up for production using known synthesis techniques. Initial preliminary tests in full cells with graphite anodes delivered promising performance and good cycling stability.

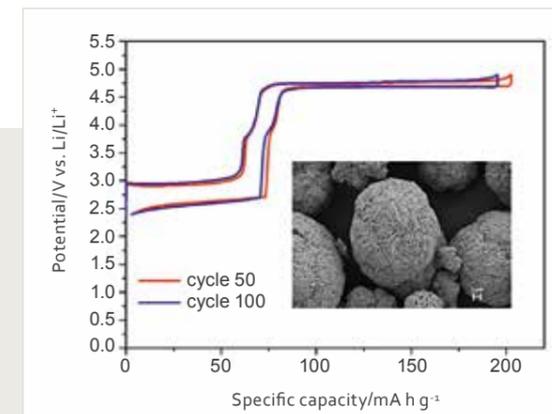
For the anode, natural graphite upgraded via spheroidisation processes is used (see fig. above). Large quantities of byproducts occur in this process. This upgrading process was replicated successfully at a laboratory scale. Approaches to increase the yield of the rounding process and thus to increase added value have been successfully identified. In addition, it was possible to make graphite waste products suitable for battery applications.



*„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.”*



// Lade-/Entladekurve des Kathodenmaterials in einer Halbzelle vs.  $\text{Li/Li}^+$ ; REM-Aufnahme des Pulvers mit typischer Partikelmorphologie.  
// Charge/discharge curve of the cathode material in a half cell vs.  $\text{Li/Li}^+$ ; SEM image of the powder with a typical particle morphology.

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

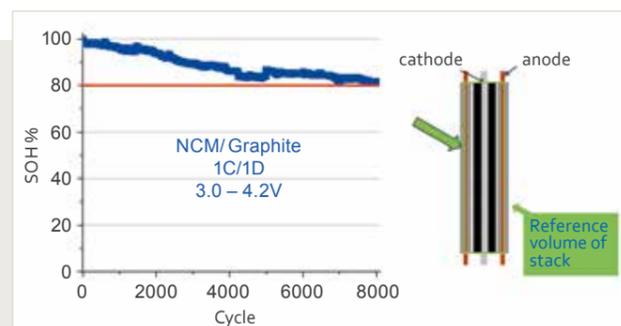
## // Sichere Produktionsprozesse für hochqualitative Elektroden

Reliable production processes for high-quality electrodes

### // Material- und Prozessentwicklung für die Elektrodenfertigung von Lithium-Ionen-Zellen und Evaluierung der Übertragbarkeit in die vorindustrielle Serienfertigung

Die elektrische Performance und die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen hängen sensitiv von der Prozesssicherheit der Elektrodenherstellung ab. Die Herstellung von Elektrodenfolien für Lithium-Ionen-Batterien basiert auf einer komplexen Prozesskette mit zahlreichen Einflussgrößen. Wichtige Prozessschritte sind die Partikelvorbehandlung, Pastenherstellung, Beschichtung und Schichtverdichtung. Die massentaugliche Produktionstechnik für die Herstellung hochqualitativer Elektroden mit sehr kleinen Fehler-toleranzen stellt eine Schlüsseltechnologie für die industrielle Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen dar. Fundierte Erkenntnisse über Einflussgrößen bei der Beschichtung und die Wirkzusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Prozessparametern aus Dispergierung und Beschichtungsprozess sowie den mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien wurden in dem vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft, Baden-Württemberg geförderten Leuchtturmprojekt  $\mu$ -Power erarbeitet.

Auf der Basis der erzielten Erkenntnisse konnte die komplette Prozesstechnik zur vorindustriellen Herstellung von Elektrodenfolien mit sehr hoher Reproduzierbarkeit entwickelt werden. Um die Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse in industrielle Fertigungstechniken zu gewährleisten, wurden Prozesssicherheit und Elektrodenqualität bei einem Projektpartner in einem serien-nahen Produktionsverfahren evaluiert. Ein Schwerpunkt lag auf der Entwicklung von Beschichtungsprozessen mit wässrigen Bindersystemen, um das kommerziell verwendete toxische NMP durch Wasser zu ersetzen. Durch die Auswahl geeigneter Bindersysteme, die Rezepturanpassung und insbesondere durch die Wahl und Optimierung der Mischparameter konnten Elektroden sehr guter Qualität mit wässrigen Bindern hergestellt werden. Die Elektroden zeichnen sich durch einen hohen Aktivmasse-anteil, exzellente Haftung und exzellente Zyklenstabilität aus.



// Wässrig beschichtete Grafitanode aus Pilotprozess.  
// Aqueous-coated graphite anode from pilot process.

### // Material and process development for electrode manufacturing of lithium-ion cells and evaluation of the transferability in pre-industrial series manufacturing

The electrical performance and durability of lithium-ion cells are highly dependent on the process reliability of electrode manufacturing. The manufacture of electrode films for lithium-ion batteries is based on a complex process chain with numerous influencing variables. Important process steps include the particle pre-treatment, paste manufacturing, coating and layer densification. Mass production-suitable methods for manufacturing high-quality electrodes with very small error tolerances are a key technology for the industrial production of lithium-ion cells. In-depth findings on variables which influence the coating and the cause-effect relationships between material properties, process parameters from the dispersion and coating process, and the mechanical and electrochemical properties of electrodes for lithium-ion batteries were developed in the  $\mu$ -Power flagship project funded by the Baden-Württemberg Ministry of Finance and Economics.

Based on the findings obtained, the complete process technology for the pre-industrial production of electrode films was developed with a very high reproducibility. In order to ensure the rapid transfer of the research findings into industrial production methods, the process reliability and electrode quality were evaluated by a project partner in a near-series production process. One focus was on the development of coating processes with aqueous binder systems to replace the commercially used toxic NMP with water. By selecting suitable binder systems, adapting the formula and, in particular, by selecting and optimising the mixing parameters, very high quality electrodes were able to be produced with aqueous binders. The electrodes are characterised by a high proportion of active mass, excellent bonding and excellent cycling stability.

// Zyklenstabilität einer Pouchzelle mit wässrig prozessierter Grafitanode und PVDF-basierter NCM-Kathode.  
// Cycle stability of a pouch cell with aqueous processed graphite anode and PVDF-based NCM cathode.

// Dr. Alice Hoffmann  
E-mail: [alice.hoffmann@zsw-bw.de](mailto:alice.hoffmann@zsw-bw.de)  
Phone: +49(0)731 95 30-558

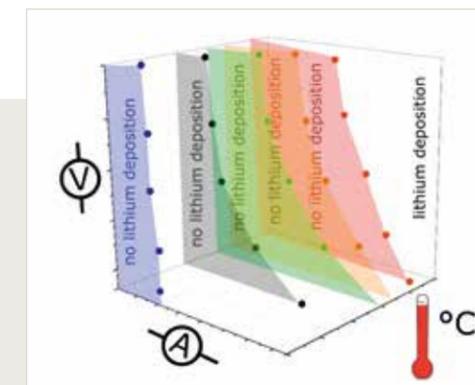
## // Alterungsmechanismen und Post-Mortem-Analysen

Ageing mechanisms and Post-mortem Analysis

### // Alterungsmechanismen, Post-Mortem-Analysen und Detektion von Lithiumabscheidung in großformatigen Lithium-Ionen-Zellen

Die Gewährleistung einer hohen Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Lithium-Ionen-Batterien ist ein wesentlicher Faktor für den Markterfolg der Elektromobilität und zur Zwischenspeicherung regenerativer Energien. Das durchgängige Verständnis der Zusammenhänge zwischen Zellmaterialien, Elektroden- und Zell-design sowie Alterungsmechanismen ist zwingend notwendig, um Alterungstests in Bezug auf Vorhersagekraft und Zeitraffung verbessern und Lebensdauerprognosen mit hoher Treffsicherheit entwickeln zu können. In dem von der EU geförderten Verbundprojekt MAT<sub>4</sub>BAT wurden am ZSW Zellen verschiedener Hersteller, die bei den Projektpartnern unter verschiedenen Bedingungen zyklisiert und/oder gelagert wurden, geöffnet und analysiert.

Dabei wurde die Abscheidung von metallischem Lithium auf den Anoden als eine der Hauptursachen für die Zellaalterung von Hochenergiebatterien im Zyklisierbetrieb identifiziert. Dieses sogenannte „Lithium Plating“ bildet sich insbesondere während des Ladens mit höheren Strömen oder bei niedrigen Temperaturen und führt zu einem zunehmenden Kapazitätsabfall sowie verschlechtertem Sicherheitsverhalten der Zellen. Im Projekt wurden die Betriebsparameter, bei denen metallisches Lithium auftreten kann, intensiv untersucht (s. Abb. unten). Grund für die Lithiumabscheidung sind Polarisierungseffekte im Elektroden-Stack, die mit Hilfe von Referenzelektrodenmessungen quantitativ bestimmt werden können. Im Projekt wurde die optische Glimmladungs-Spektroskopie (GDOES) zur Tiefenprofilbestimmung der Lithiumverteilung in der Anode etabliert. Zudem konnte erfolgreich eine Methode implementiert werden, bei der mittels rekonstruierter Zellen und Referenzelektrodenmessungen Betriebsbedingungen sicher vorher-sagbar werden. Durch die Wahl angepasster Ladestrategien kann die Lithiumabscheidung weitgehend vermieden und die Lebensdauer der Zellen signifikant erhöht werden.



// Bestimmung der Ladebedingungen für Lithium Plating in Abhängigkeit von Temperatur, Stromdichte und Ladeschlussspannung.  
// Determining the charge conditions for lithium plating depending on temperature, current density and end-of-charge voltage.

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

## // 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.

Schwerpunkt unserer Arbeit ist der Betrieb einer vorwettbewerblichen „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“, die den seriennahen Gesamtproduktionsprozess für Hardcase-Zellen abbildet (PHEV-1-Zellen, >20 Ah). Im Fokus 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. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um Fragen zur Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrie-relevanten Maßstab.

Kernaufgabe des ECP-Teams ist es, im Rahmen von Industrienaufträgen 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 einer guten Mischung von Technikern, Ingenieuren und Elektrochemikern, auf Basis des Betriebs der Pilotanlage mittlerweile über wichtige Beratungskompetenz bezüglich Zellfertigung sowie Kostenbetrachtungen.



*„Mit der Forschungsplattform stellen wir nun unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft eine stabile Basis für gemeinsame Projekte zur Produktionsforschung zur Verfügung.“*

// Wolfgang Brugger, Head of Department  
E-mail: wolfgang.brugger@zsw-bw.de, Phone: +49 (0) 731 95 30-344

### // 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, consisting of a good mix of technicians, engineers and electrochemists, now has crucial consulting expertise on cell manufacturing and cost considerations, based on operation of the pilot plant.

## // Referenzprojekt gemeinsam mit neun Industriepartnern

Reference project with nine industry partners

### // Referenzprojekt gemeinsam mit neun Industriepartnern

Das Referenzprojekt war das erste Industrieprojekt im Rahmen der Nutzungsphase der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“ und wurde im Januar 2015 gestartet. Es wurde von den neun Industriepartnern der FPL finanziert und hatte zum Ziel, für die Referenzzelle einen reproduzierbaren Referenzprozess für alle Produktionsschritte zu erarbeiten, der während der nachfolgenden Nutzung der FPL jederzeit als Vergleichsmaßstab verwendet werden kann. Das elektrochemische System der Referenzzelle war bereits 2013 in gemeinsamer Abstimmung zwischen Industriepartnern und ZSW festgelegt worden und in einem internen Vorprojekt des ZSW vorqualifiziert worden. Im Rahmen des Referenzprojektes wurden nun mit diesem System erstmals Lithium-Ionen-Zellen im PHEV-1-Format mit einer Nennkapazität von 22 Ah aufgebaut (s. Abb. unten).

Im Verlauf des Projekts wurden dazu auf der FPL insgesamt ca. 3.000 m Kathode und ca. 3.800 m Anode produziert, mehr als 1.000 Flachwickel hergestellt und ca. 850 PHEV-1-Zellgehäuse verbaut. Die fertig assemblierten Zellen, die alle Qualitätskriterien erfüllten, standen für Formation, Zyklisierung und weitere Tests zur Verfügung. In Sicherheitstests zeigten sie bereits gute Ergebnisse. Nach Abschluss des Projekts steht nun für jeden Produktionsschritt ein stabiler Parametersatz zur Verfügung, mit dem der Referenzprozess auf der FPL in Einzelschritten oder gesamthaft „aufgerufen“ werden kann.

### Weitere Schwerpunktaktivitäten

Ein erstes bilaterales Projekt mit Industriepartnern begann direkt im Anschluss an das Referenzprojekt; daneben wurde die FPL auch in strategischen Förderinitiativen des Bundes als Projektpartner für die Produktionsforschung im industrienahen Maßstab positioniert. Mit der Teilnahme am Giga-LIB-Projekt des BMBF konnte dabei ein erster Erfolg verbucht werden.



### // Reference project with nine industry partners

The reference project was the first industrial project in the context of the utilisation phase of the “Research platform for industrial production of lithium-ion cells” (FPL), launched in January 2015. It was funded by the nine industry partners of FPL and served to create a reference cell with a reproducible reference process for all production steps that could be used as a reference at any time during subsequent use by FPL. The electrochemical system of the reference cell had already been specified in 2013 in a joint approach between industry partners and ZSW and had been pre-qualified in a preliminary internal ZSW project. In the course of the reference project, this system was used to produce Li-ion cells (see figure below) in the PHEV-1 format, and with a nominal capacity of 22 Ah, for the very first time.

A total of approximately 3,000 m of cathodes and 3,800 m of anodes were produced at FPL in the course of the project, including more than 1,000 jelly rolls and 850 PHEV-1 cell housings were used to build cells. The operational assembled cells that met all quality criteria were available for formation, cyclisation and other tests. They had already shown good results in safety tests. As the project is complete, every production step now has a reliable set of parameters with which the reference process at FPL can be “called” either in individual steps or in its entirety.

### Other key activities

A first bilateral project with industry partners was launched immediately after the reference project; in addition, FPL was also positioned as a project partner for production research at an industry-relevant scale as part of German Federal strategic funding initiatives. Participation in the Giga-LIB project of BMBF was an initial success in that respect.

// Rainer Stern  
E-mail: rainer.stern@zsw-bw.de  
Phone: +49(0)731 95 30-345

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

### // Unsere Kernkompetenzen

Wir untersuchen und entwickeln elektrochemische Energiespeichersysteme. Damit Akkumulatoren auch unter schwierigsten Bedingungen sicher und leistungsfähig sind, stehen deren 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 stationäre Energiespeicherung in elektrischen Netzen und in portablen Geräten genauso wie in elektrifizierten Antriebssträngen für die Elektromobilität.

### Batterietest und Sicherheitstest

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 wir die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie deren Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilen.

### Batteriesystemtechnik

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



*„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

### // Our main focus

We investigate and develop 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 in portable devices, as well as in electrified drive trains for electromobility.

### Battery test and safety test

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, we can assess the reactions and potential risks of heavily damaged accumulators and their resistance to various abuse conditions and operating failures.

### Battery system technology

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), we perform 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. The goal is a dynamic, reliable and efficient operation of the storage system in the applications mentioned.

## // Sicherheitsaspekte für Solar-Home-Speichersysteme

Safety aspects for solar home storage systems

### // Sicherheitsaspekte von Lithium-Batterien für Solar-Home-Speichersysteme

Mit der wachsenden Bedeutung von Solar-Home-Speichersystemen bekommt die Verbreitung von Lithium-Batterien einen neuen Stellenwert. Unter diesen Bedingungen ist die Eigensicherheit derartiger Speicher von höchstem Interesse. Von der Installationsumgebung, der Zuverlässigkeit und Störsicherheit des Batterie- und Energiemanagementsystems bis zur Eigensicherheit der verbauten Batteriezellen sind alle Komponenten im Fokus, um einen sicheren, störungs- und vor allem gefahrfreien Betrieb dieser Speicher zu realisieren.

Im Rahmen der öffentlich geförderten Verbundprojekte „Sicherheit und Netzdienlichkeit von elektrischen Heimspeichersystemen mit Lithium-Ionen-Batterien“ und „Sicherheit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen mit Speichersystemen“ werden sowohl die Alterungseigenschaften von Batterien als auch das Missbrauchsverhalten von Batterien in Heimspeichern untersucht. Das Untersuchungsspektrum umfasst extreme elektrische und mechanische Belastungen oder das Verhalten der Lithium-Batterien bei Überflutung. Derartige extreme Belastungen sollen natürlich im praktischen Betrieb von den Speichern ferngehalten werden; dennoch können sie unter äußerst ungünstigen Bedingungen auftreten, und dann sind Batterietechnologien, die über eine hohe Eigensicherheit verfügen, von besonderem Interesse.

### // Safety aspects of lithium batteries for solar home storage systems

With the growing importance of solar home storage systems, the spread of lithium batteries becomes more significant. Under these conditions, the intrinsic safety of such storage systems is of utmost importance. The installation environment, the reliability and interference resistance of the battery and energy management system, and the intrinsic safety of the employed battery cells are all key to realising the safe, failure-free and, above all, non-hazardous operation of these storage systems.

The ageing characteristics of batteries and the abuse behaviour of batteries in domestic storage systems are being examined as part of the publicly funded joint projects “Safety and grid-subservice of domestic electric storage systems with lithium-ion batteries” and “Safety and reliability of PV systems with storage systems”. The investigation includes aspects of extreme electrical and mechanical loads, and the behaviour of lithium batteries in case of flooding. Naturally, storage systems should be shielded from such extreme loads in daily use but they nevertheless can occur under extremely unfavourable conditions, and in these cases battery technologies with high intrinsic safety are of particular interest.



// IR-Aufnahme einer Lithium-Ionen-Zelle im Sicherheitstest.  
// IR imaging of a lithium-ion cell during the safety test.

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

## // komDRIVE – Einsatz von Elektrofahrzeugen im Güternahverkehr

komDRIVE – the use of electric vehicles for short-haul transportation

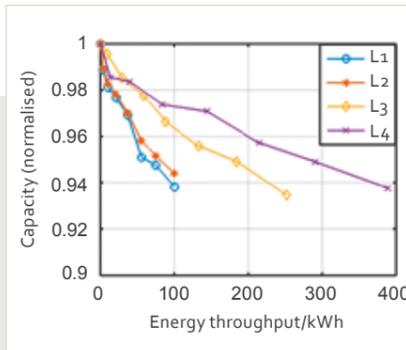
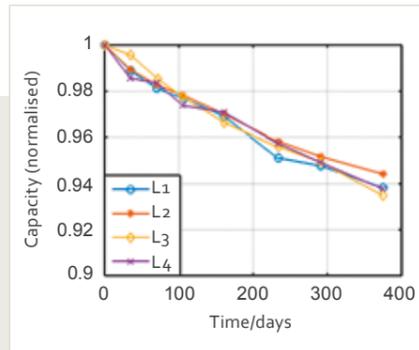


### // komDRIVE – Einsatz von Elektrofahrzeugen im Güternahverkehr

Das zum Jahresende 2015 erfolgreich abgeschlossene Projekt komDRIVE befasste sich mit dem Elektrifizierungspotenzial kommerzieller Kraftfahrzeugflotten im Wirtschaftsverkehr. Das Vorhaben ging der zentralen Frage nach, unter welchen Bedingungen der Einsatz von Elektrofahrzeugen im Güternahverkehr technisch, ökologisch und ökonomisch vorteilhaft ist und welche Synergien sich zur Stromwirtschaft erzielen lassen.

Durch die Steuerung der Ladezeiten und -leistungen und ggf. durch Rückspeisung können Fahrzeugbatterien positive und negative Leistung für das Netz bereitstellen. Durch die Netzkopplung der Elektrofahrzeugflotten ergeben sich für die Wirtschaftlichkeit der Fahrzeugbatterien neue Freiheitsgrade. Die damit verbundenen Auswirkungen auf die Lebensdauer der Batterien wurden am ZSW test- und modellbasiert untersucht, indem Belastungsprofile von vier unterschiedlichen Nutzungsszenarien an Batteriemodulen vergleichend getestet wurden und das resultierende Alterungsverhalten analysiert wurde.

Die untersuchten Anwendungsfälle umfassen das ungesteuerte und das gesteuerte Laden (L1 und L2, s. Abb. unten) sowie die zusätzliche Teilnahme der verteilten, aggregierten Batteriespeicher der Fahrzeugflotten am Day-ahead-Markt und am Regelenergiemarkt (L3 und L4, s. Abb. unten). Interessanterweise lässt sich feststellen, dass die untersuchten Batterien in allen Szenarien über die Zeit ein sehr ähnliches Alterungsverhalten aufweisen (Abb. unten links). Es konnte zudem gezeigt werden, dass die Batterien bei annähernd gleicher Alterung einen signifikant erhöhten Energieumsatz für die Teilnahme am Strommarkt bzw. für die Erbringung von Netzdienstleistungen erreichen. Voraussetzung dafür ist, dass zusätzliche Alterungsmechanismen vor allem bei tiefen Temperaturen vermieden werden.



// Vergleichender Alterungstest von Batteriemodulen für unterschiedliche Belastungsszenarien der Fahrzeugflotten mit Netzkopplung.  
// Comparative ageing test of battery modules for different load scenarios of vehicle fleets with grid coupling.

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

### // komDRIVE – the use of electric vehicles for light duty transportation

The komDRIVE project, successfully completed at the end of last year, dealt with the electrification potential of commercial vehicle fleets in commercial transportation. The project focused on finding the conditions under which the use of electric vehicles in light duty transportation is technically, environmentally and economically advantageous, and on analysing synergistic effects with the electricity industry.

By controlling the charging time and power and, if necessary, feeding energy back, vehicle batteries can deliver positive and negative power to the grid. Additional degrees of freedom can result for the economic viability of vehicle batteries by coupling electric vehicle fleets to the grid. The associated impact on battery life was examined at ZSW on a test and model base by comparing and testing load profiles from four different usage scenarios on battery modules, and then analysing the resulting ageing behaviour.

The application cases studied include uncontrolled and controlled loading (L1 and L2, see fig. below) as well as the additional participation of distributed, aggregated battery storage systems of vehicle fleets in the day-ahead and balancing power markets (L3 and L4, see fig. below). Interestingly, it can be noted that the batteries studied exhibited a very similar ageing behaviour over time in all scenarios (see fig. below left). It was also shown that the batteries, with approximately the same level of ageing, achieve a significantly increased energy throughput for participation in the electricity market or the provision of ancillary services. The requirement is that additional mechanisms of ageing, especially at low temperatures, are avoided.

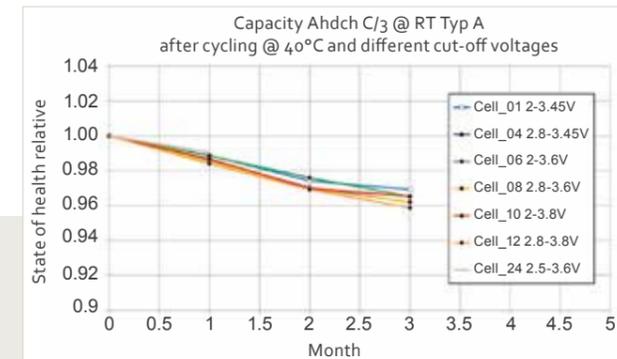
## // Spannungsgrenzen eines Eisenphosphatsystems

Voltage limits of an iron phosphate system

### // Elektrische Untersuchung von Zellen, Modulen und Batteriesystemen

Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens von Batterien werden Zellen, Module und Hochvoltspeicher Performance- und Lebensdauertests unterzogen. Durch das wachsende Maß an dezentralen Energieerzeugern (PV-Heimanlagen) gewinnt die Speicherung von Elektroenergie im dezentralen Bereich ebenfalls zunehmend an Bedeutung. Der Untersuchung von derartigen Batteriespeichern widmen sich derzeit zwei öffentlich geförderte Projekte. Neben den Performancedaten werden im Rahmen des Projektes die Sicherheitsrisiken und die Alterung der Batteriespeicher untersucht. Speicherbatterien auf der Basis von Lithium-Eisenphosphat (LFP) werden häufig in derartigen Batteriespeichern verwendet, weil man sich eine verbesserte Sicherheit erhofft.

Der Einfluss der Ladeend- und der Entladeschluss-Spannung auf die verfügbare Kapazität wurde für ein Eisenphosphatsystem untersucht. Im Spannungsbereich von 3,8 V bis 2,0 V ließ sich nur ein Kapazitätsgewinn gegenüber den Standardbedingungen von ca. 2 % erzielen. Andererseits ist es von Interesse, wie tolerant das Eisenphosphatsystem gegenüber diesen Spannungsgrenzen ist. Deshalb wurden entsprechende zyklische Lebensdaueruntersuchungen begonnen, die zusätzlich über eine erhöhte Temperatur (40 °C) beschleunigt werden. Bisher kann noch keine eindeutige Tendenz des Spannungseinflusses festgestellt werden, d. h. das LFP-System verhält sich bisher weitestgehend tolerant gegenüber den erweiterten Spannungsgrenzen. Parallel dazu wird der Einfluss der Temperatur und des Ladegrades auf die kalendrische Lebensdauer untersucht.

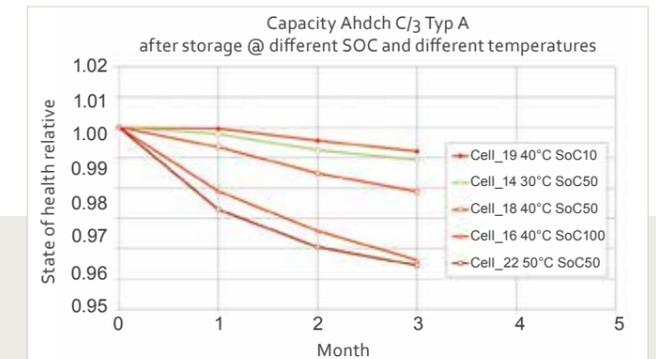


// Einfluss der Spannungsgrenzen beim Zyklieren auf das Kapazitätsverhalten (links).  
Einfluss der Temperatur und des Ladestandes auf das Kapazitätsverhalten bei Lagerung (rechts).  
// Influence of voltage limits on capacity behaviour when cycling (left).  
Influence of temperature and state of charge on capacity behaviour during storage (right).

### // Electrical examination of cells, modules and battery systems

To characterise the electrical properties, performance capabilities and ageing behaviour of batteries, the cells, modules and high-voltage storage systems undergo performance and service life tests. Along with the increasing use of decentral energy generation systems (domestic PV systems), the storage of electrical energy in decentralised applications is becoming increasingly important as well. Two publicly funded projects are currently researching such battery storage systems. The project is examining safety risks and the ageing behaviour of battery storage systems, in addition to the measurement of performance data. Storage batteries based on lithium iron phosphate (LFP) are frequently used in such battery storage systems because it is hoped that they offer improved safety.

The impact of the end-of-charge and end-of-discharge voltages on the available capacity has been investigated for iron phosphate systems. In the voltage range of 3.8 V to 2.0 V, it was only possible to achieve a capacity increase of about 2% compared to standard conditions. The question remains as to how tolerant the iron phosphate system is against these voltage limits. So the corresponding cyclic service life tests were started, which are additionally accelerated by a slightly elevated temperature (40 °C). So far, there is no clearly demonstrated tendency in respect of the voltage's influence, i.e. the LFP system is largely tolerant of the extended voltage limits. At the same time, the influence of temperature and charge level on calendar life is being examined.



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

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

### // Unsere Kernkompetenzen

#### Technologien für neue Energiespeicherkonzepte mit wässrigen Elektrolyten

Die Brennstoffzellenentwicklung adressiert vor allem den Einsatz im Automobil, der im Hinblick auf Kosten und Lastwechseldynamik große Herausforderungen stellt. Stabilisierte Katalysatoren und Elektroden sowie an die Anwendung angepasste Betriebsstrategien und Hybridisierungskonzepte erlauben eine deutliche Steigerung der Lebensdauer und eröffnen damit Einsatzfelder in der Energietechnik.

Für leistungsstarke Antriebe wird die Hybridisierung von Brennstoffzellen mit Hochleistungsspeichern entwickelt. Systeme mit wässrig-alkalischen Elektrolyten zeichnen sich durch niedrigen Innenwiderstand und hohe Sicherheit aus. Sinterelektroden aus beschichteten, nanostrukturierten Nickelpartikeln bilden die Basis für asymmetrische leistungsstarke Kondensatoren. Die Elektroden zeigen selbst bei einer Belastung mit 400 C keinen nennenswerten Kapazitätseinbruch. Nach demselben Grundprinzip können dreidimensional strukturierte Elektroden für die Wasserelektrolyse im alkalischen Elektrolyten hergestellt werden.

In Zink-Luft-Zellen konnte die Zyklenfestigkeit der Zinkelektrode durch neue Ableiterstrukturen gesteigert werden.

Unser Team verfügt über langjährige Erfahrung mit elektrochemischen Energiewandlern sowie über die entsprechende Infrastruktur, um neue technologische Ansätze schnell im Labor zu verifizieren und demonstrieren.

### // Our main focus

#### Technologies for new energy storage concepts with aqueous electrolytes

Our fuel cell development specifically addresses automotive applications which pose a serious challenge in terms of costs and load variation dynamics. Stabilised catalysts and electrodes as well as adjusted operating strategies and hybridisation concepts allow for a significant increase in service life, which opens up areas of application in energy technology.

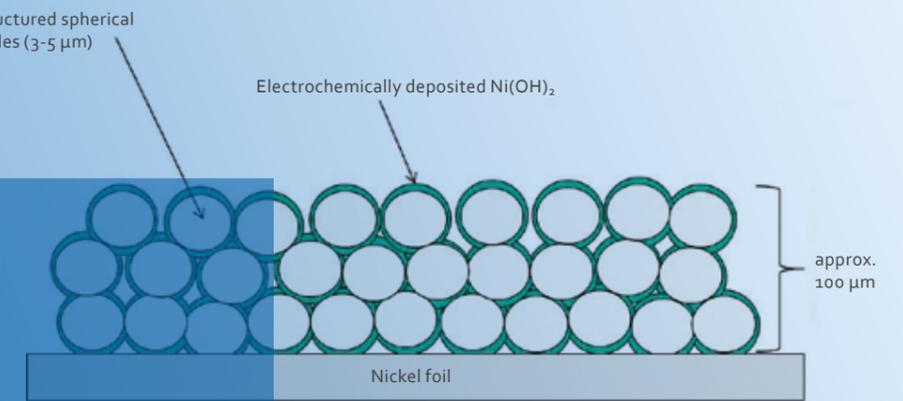
Hybridisation of fuel cells with high-performance storage systems is being pursued to develop powerful drives. Systems involving aqueous alkaline electrolytes distinguish themselves with low internal resistance and a high security level. Sintered electrodes coated with nano-structured nickel particles form the basis of powerful asymmetric capacitors. The electrodes do not show any significant capacity drop even with a load of 400 C. Three-dimensional structured electrodes for water electrolysis in alkaline electrolytes can be produced according to the same fundamental principle.

In zinc-air cells, the cyclic stability of the zinc electrode was raised via new conductor structures.

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

## // Beschichtung von Nickelelektroden

### Coating of nickel electrodes



// Schematische Darstellung des Aufbaus von beschichteten Nickelelektroden.  
// Schematic representation of coated nickel electrodes.

### // Entwicklung neuartiger, wässrig-alkalischer Hochleistungselektroden mit hohen Oberflächen

In der industriellen Praxis werden für wässrig-alkalische Zellen im wesentlichen Nickelschaum- und Nickelsinterielektroden 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. Ein Ziel war es daher, 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. Die hergestellten oberflächenreichen Nickelschichten haben eine Schichtdicke von etwa 100 μm und eine Porosität von 66 %. Die Oberfläche wird dadurch um den Faktor 78,5 im Vergleich zu planaren Ableitern gesteigert.

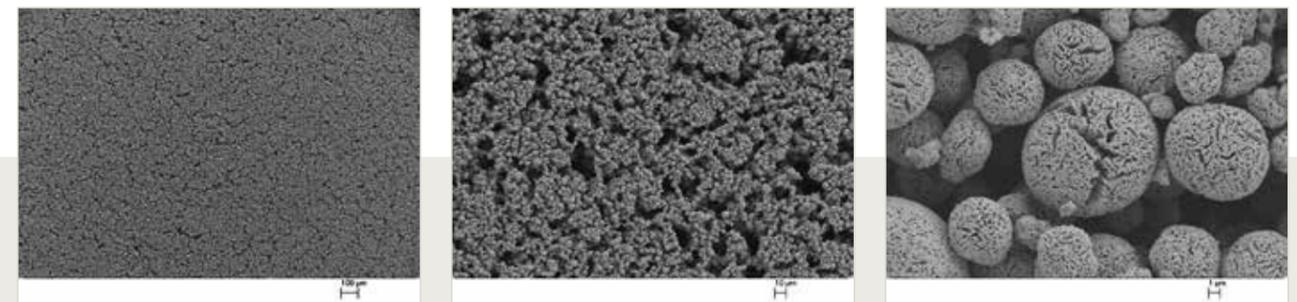
Die oberflächenreichen Nickelelektroden wurden anschließend mit Nickelhydroxid, Ni(OH)<sub>2</sub>, als Aktivmaterial beschichtet, um die Belastbarkeit der oberflächenreichen Nickelelektrode zu prüfen. Für die Proben mit 5 und 10 μm Ni(OH)<sub>2</sub> Äquivalentschichtdicke konnte im Bereich bis 400 mA cm<sup>-2</sup> nahezu keine Abnahme der Kapazität beobachtet werden. Diese Belastung entspricht etwa 200 A g<sup>-1</sup> für die 5-μm-Ni(OH)<sub>2</sub>-Schicht. Der Grenzwert der Stromdichte für diese zwei Proben konnte im aktuellen Experiment nicht erreicht werden. Dieser überraschende Befund legt eine sehr starke Wechselwirkung der 5- und 10-μm-Ni(OH)<sub>2</sub>-Schichten mit den sphärischen Nickelpartikeln nahe.

### // Development of novel, aqueous-alkaline high-performance electrodes with large surface areas

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

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

The large-surface nickel electrodes are then coated with nickel hydroxide, Ni(OH)<sub>2</sub>, as an active material to test the resilience of the large-surface nickel electrode. For samples with an equivalent Ni(OH)<sub>2</sub> layer thickness of 5 and 10 μm, they observed almost no decrease in capacity in the range up to 400 mA cm<sup>-2</sup>. This load roughly corresponds to 200 A g<sup>-1</sup> for the 5 μm thick Ni(OH)<sub>2</sub> layer. The current density limit for these two samples was not reached in the current experiment. This surprising finding suggests a very strong interaction of the 5 and 10 μm thick Ni(OH)<sub>2</sub> layers with the spherical nickel particles.



// Elektronenmikroskopische Aufnahme von oberflächenreichen Nickelelektroden. Beschichtung von nanostrukturierten Nickelpartikeln auf Nickelfolie.  
// Electron microscope imaging of large-surface nickel electrodes. Nanostructured nickel particle coating on nickel foil.



*„Katalysatoren, Elektroden und Zellen sind eine wesentliche Voraussetzung zur Verbesserung von Brennstoffzellen und Akkumulatoren. Die Konzentration auf wässrige Elektrolyten bietet hohe Leitfähigkeiten bei gleichzeitig größtmöglicher Sicherheit.“*

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

*“Catalysts, electrodes and cells are key requisites for the improvement of fuel cells and other electrochemical power sources. The concentration on aqueous electrolytes allows high conductivity paired with maximum safety.”*



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

## // Weniger Platin in PEM-Brennstoffzellen

Less platinum in PEM fuel cells

20 nm

20 nm

### // Katalysatoren auf stabilen Trägermaterialien

Platin und seine Legierungen ermöglichen nach wie vor die höchsten Leistungsdichten in Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Zur Minimierung der Platinbeladung werden Platin-Nanopartikel auf kohlebasierenden Trägermaterialien eingesetzt. Allerdings ist Kohlenstoff unter den Einsatzbedingungen der Brennstoffzellenkathode nicht stabil, was zu einer Leistungsdegradation der Elektrode führt. Aus diesem Grund werden oxidationsstabile Katalysatorträger gesucht. Spezielle Kohlenstoffmodifikationen weisen hier Vorteile gegenüber den üblicherweise eingesetzten Rußen wie z. B. Vulcan XC 72 auf.

In diesem Vorhaben wurden verschiedene Verfahren zur Deposition von Platin-Nanopartikeln auf Kohlenstoffträgern im Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Metallpartikeldurchmesser untersucht. Hierbei sollte ein möglichst reproduzierbares Verfahren, das zu Nanopartikeln mit möglichst kleinem Durchmesser führt, identifiziert werden. Beim Vergleich von fünf verschiedenen Präparationsverfahren erwies sich ein modifiziertes Polyolverfahren als optimal. Mit diesem Verfahren war es möglich, mit hoher Reproduzierbarkeit Platin-Nanopartikel mit einem mittleren Durchmesser von 5 nm auf Vulcan-XC-72-Ruß abzuscheiden (s. Abb. unten).

Mit dem modifizierten Polyolverfahren wurden ebenfalls Platin-Nanopartikel auf stabilisierten Kohlenstoffmaterialien abgeschieden. Die so hergestellten Katalysatoren zeigten hohe Stabilität bei der Potenzialzyklisierung sowie mit gewöhnlichen Rußträgern vergleichbare massenspezifische Aktivitäten. Im Verlauf weiterer Arbeiten werden zusätzlich anorganische Trägermaterialien untersucht.

// Vergleich der erreichten Partikelgröße und Reproduzierbarkeit verschiedener Präparationsverfahren zur Abscheidung von Platin-Nanopartikeln auf Vulcan-XC-72-Ruß.

// Comparison of the particle size achieved and the reproducibility of different preparation methods for the deposition of platinum nanoparticles on Vulcan XC-72 carbon powder.

### // Catalysts on stable support materials

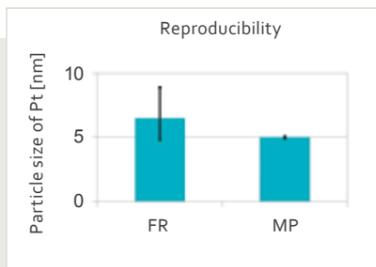
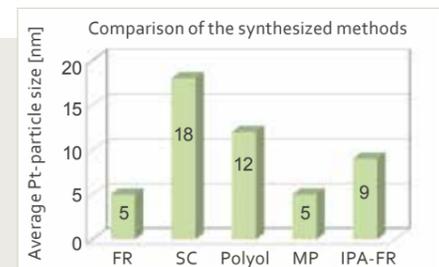
Platinum and its alloys still allow for the highest power densities in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC). To minimise platinum loading, platinum nanoparticles are used on coal-based support materials. However, carbon is not stable under the operating conditions of the fuel cell cathode, which leads to a performance degradation of the electrode. For this reason, oxidation-resistant catalyst support materials are being researched. Special carbon modifications have advantages over conventionally used carbon powders like Vulcan XC 72.

In this project, various methods for the deposition of platinum nano-particles on carbon support materials were examined in terms of reproducibility and metal particle diameter. The aim was to identify a reproducible process that leads to nanoparticles with a diameter as small as possible. In a comparison of five different preparation methods, one modified polyol process turned out to be optimal. With this method, it was possible to deposit platinum nanoparticles with a mean diameter of 5 nm on Vulcan XC-72 carbon powder with high reproducibility (see fig. below).

Employing the modified polyol process, platinum nanoparticles were also deposited on stabilised carbon materials. The catalysts thus prepared exhibited a high stability during potential cyclisation and mass-specific activities comparable with ordinary carbon powder supports. In the course of further work, additional inorganic support materials will be investigated.

// Das modifizierte Polyolverfahren ergab eine mittlere Partikelgröße von 5 nm mit hoher Reproduzierbarkeit.

// The modified polyol method produced a mean particle size of 5 nm with high reproducibility.



FR: formaldehyde reduction, SC: sulfite complex process, MP: modified polyol process, IPA FR: formaldehyde reduction in isopropanol.

// Dr. Ludwig Jörissen

E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-605

## // Doppelschichtkondensatoren – Powercaps

Electric double-layer capacitors – Powercaps

### // Materialentwicklung für positive und negative wässrig-alkalische Hochleistungselektroden

Asymmetrische Doppelschichtkondensatoren (Powercaps) auf Basis wässrig-alkalischer Elektrolyte zeigen neben der erhöhten Sicherheit aufgrund des nicht brennbaren Elektrolyten den Vorteil hoher Leistungsfähigkeiten durch die hohen Leitfähigkeiten der wässrigen 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.

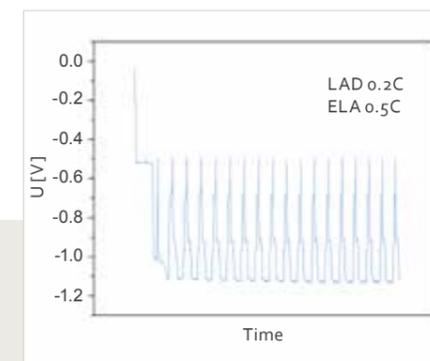
Im Rahmen des vom Land Baden-Württemberg geförderten F&E-Projektes „FastStorage BW II“ konnte begonnen werden, sowohl positive als auch negative Aktivmaterialien auf Basis kostenoptimierter Materialien für asymmetrische Doppelschichtkondensatoren zu entwickeln. Für die positiven Materialien bieten sich MnO<sub>2</sub>-Modifikationen als alternative Werkstoffklasse an. Manganoxide wurden elektrochemisch auf verschiedenen Trägern abgeschieden. Die Untersuchungen der abgeschiedenen Schichten zeigten eine sehr gute Zyklisierbarkeit bei erhöhten Stromdichten. Im Verlauf des Projektes müssen aber die spezifischen Kapazitäten der Materialien weiter erhöht werden, um für praktische Anwendungen relevante Größen zu erreichen. 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 (s. Abb. unten) als sehr interessante Werkstoffe, die es im weiteren Projektverlauf detaillierter zu untersuchen gilt.

// REM-Aufnahme von oberflächenreichen Nickelelektroden.  
// SEM imaging of large-surface nickel electrodes.

### // Material development for positive and negative aqueous alkaline high-performance electrodes

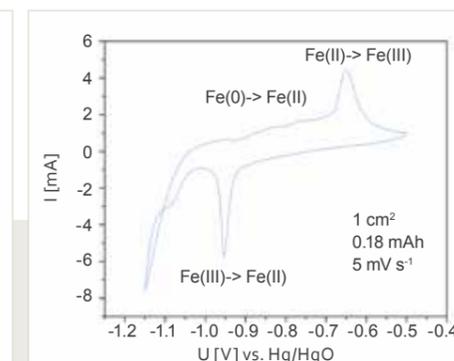
Asymmetric double-layer capacitors (Powercaps) based on aqueous alkaline electrolytes offer increased safety due to the non-flammable electrolyte along with the advantage of high performance capabilities owed to the high conductivity of aqueous electrolytes. They exhibit significantly higher energy densities than the wide-spread supercapacitors but with a comparable loading capacity. Nickel hydroxides are usually used by the industry to manufacture the positive electrode. Common negative electrode materials include activated carbon with different active materials.

As part of the Federal State of Baden-Württemberg funded R&D project "FastStorage BW II", it was possible to begin work on developing both positive and negative active materials based on cost-optimised materials for asymmetric double-layer capacitors. MnO<sub>2</sub> modifications as an alternative class of materials lend themselves to use as positive materials. Manganese oxides were electrochemically deposited on support materials. The examination of deposited layers revealed a very good cyclability at elevated currents but the specific capacities of the materials have to be further increased in the course of the project in order to achieve magnitudes relevant to practical application. Compounds based on zinc and iron were investigated for the negative electrode material side. Surprisingly, iron-based materials (see fig. below) proved to be very interesting and will have to be looked into in more detail as the project progresses.



// Zyklisierbarkeit eisenbasierter Materialien für asymmetrische Doppelschichtkondensatoren.

// Cyclability of iron-based materials for asymmetric double-layer capacitors.



// Zyklovoltammogramm eisenbasierter Materialien für asymmetrische Doppelschichtkondensatoren.

// Cyclovoltammometric measurement of iron-based materials for asymmetric double-layer capacitors.

// 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 ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymer-Elektrolyt-Membran-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 unserer Entwicklungen von PEMFC-Komponenten und -Stacks fängt an bei wenigen Watt und erstreckt sich bis zu 100 kW<sub>el</sub>. Wir optimieren Brennstoffzellen auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von Herstellertechniken und die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks sowie automobiltaugliche Brennstoffzellen. Beispielsweise können Gasdiffusionslagen (GDL) sowohl hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit als auch ihrer Struktur analysiert werden.

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 (HZB) 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.



*„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 main focus

The research department is specialised in the development of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) technology. Its core areas of expertise are the construction, characterisation and simulation of fuel cells 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>. We optimise the output, service life, efficiency and compactness of fuel cells. This also involves researching and estimating ageing processes and error analyses. We also focus on developing manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks and fuel cells suitable for vehicles. For example, gas diffusion layers (GDLs) can be analysed both in terms of their surface finish and structure.

Modelling and simulating processes in fuel cells enables us to rapidly optimise component structures and operating conditions. This also includes the development and establishment of completely new approaches using advanced simulation software. The simulation results are verified using meaningful hardware and conducting experiments under realistic conditions. For example, the water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using 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 (HZB). These technologies enable temporal and spatial resolutions that are among the best in the world.

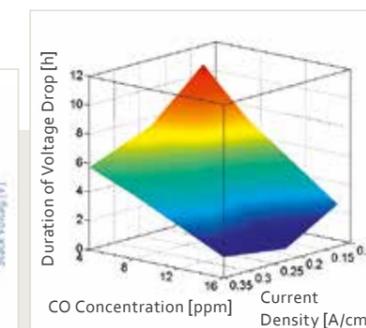
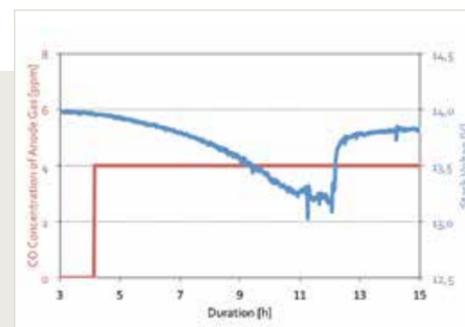
## // Prognose und Betriebsmanagement stationärer PEMFC-Systeme

Forecasting and operational management of stationary PEMFC systems

### // Prognose und Betriebsmanagement von stationären PEMFC-Systemen mit dem Ziel einer erhöhten Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit

Die Verwendung von Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFC) in stationären Blockheizkraftwerken ermöglicht eine emissionsarme Kraft-Wärme-Kopplung mit vergleichsweise hohem Wirkungsgrad, auch unter Einsatz von Reformat anstelle von reinem Wasserstoff. Das Vorhandensein von Kohlenmonoxid (CO), das ein Nebenprodukt der Reformierung darstellt, verringert jedoch die Lebensdauer und Leistung der PEMFC. Durch eine gezielte Diagnose des Betriebszustands verbunden mit der Einleitung entsprechender Steuerungsmaßnahmen sowie einer Prognose der verbleibenden Lebensdauer kann der Betrieb stationärer Systeme optimiert werden.

Im Rahmen des EU-Projektes SAPPHERE (GA 325275) wurde der Einfluss einer gezielten Alterung sowohl im Dauerbetrieb als auch unter verschärften Stressbedingungen parallel in verschiedenen europäischen Laboren untersucht. Sowohl der stationäre Betrieb als auch der Betrieb unter beschleunigter Zellaalterung wurde hier analysiert (s. Abb. unten). Gleichzeitig erfolgte eine Diagnose des jeweils aktuellen Alterungszustands u. a. mittels Impedanzspektroskopie, Cyclovoltammetrie und der Aufnahme von Polarisationskurven. Durch die Kombination verschiedenster Diagnosemethoden wurden gemeinsam mit den Projektpartnern Methoden entwickelt, um den zukünftigen Betriebszustand von Brennstoffzellen vorauszusagen. Des Weiteren wurde der Einfluss von CO auf die Leistung der PEMFC bei unterschiedlichen Stromdichten analysiert. Der zeitliche Verlauf der Spannungen bei gegebener Stromdichte wurde als Indikator für die Katalysatorvergiftung herangezogen. Anhand der Transienten wurde ein Regler entwickelt, der Leistungsabfälle mittels minimaler Zugabe von Luft zum Anodengasstrom kompensiert.



// Untersuchung der Katalysatorvergiftung an PEMFC. Links: Zeitlicher Spannungsabfall bei 0,35 A/cm<sup>2</sup> mit 4 ppm CO. Rechts: Einstellungszeit des Spannungsabfalls nach CO-Zugabe in Abhängigkeit von der Stromdichte und dem CO-Anteil.

// Investigating the catalyst poisoning of PEMFCs. Left: temporal voltage drop at 0.35 A/cm<sup>2</sup> with 4 ppm CO. Right: Time the voltage drop occurs after adding CO as a function of the current density and the CO fraction.

// Dr. Merle Klages  
E-mail: merle.klages@zsw-bw.de  
Phone: +49(0)731 95 30-209



## // Multiskalensimulationen

Multiscale simulations

### // Multiskalensimulationen zur realistischen Beschreibung des Gastransports in einer Brennstoffzelle

Vollzell-CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) erlauben eine realistische Beschreibung des Zellbetriebs einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle, indem sie den Gas- und Wärmetransport, die elektrochemische Reaktion und den Wasserhaushalt als miteinander verknüpfte Prozesse berücksichtigen und die resultierende elektrische Leistung vorhersagen. Hierbei werden lokale Unterschiede über die Fläche des Gasverteilerfeldes bei Wahl eines genügend feinen Gitters voll berücksichtigt. Die meisten Modelle beschreiben die porösen Medien in der Zelle, wie die Gasdiffusionslage (GDL), nur integral und homogen, d. h. lokale Unterschiede in Struktur und Dichte, wie sie etwa unter den Gasverteilerstegen und den Kanälen auftreten, werden ignoriert. Dasselbe gilt für die lokal sehr unterschiedliche Verteilung des kathodenseitig entstehenden Wassers, das die GDL teilweise blockieren kann.

Am ZSW wird ein Multiskalenansatz entwickelt, bei dem in Schritt 1 (s. Abb. unten) die Struktur der GDL unter Berücksichtigung der Verpressung mittels Röntgenstrahlen ermittelt wird. Daneben wird eine gewöhnliche Vollzellsimulation zur Ermittlung der Temperatur- und Feuchteverteilung in der Zelle durchgeführt. Die Daten werden in Schritt 2 benutzt, um durch Monte-Carlo-Simulation die Verteilung des Flüssigwassers in der lokalen Struktur auf der Sub-Millimeter-Skala zu bestimmen. Mit diesen Eingangsdaten kann anschließend auf derselben Struktur die lokale Permeabilität ohne und mit Wasser bestimmt werden (Schritt 3). Diese lokalen Permeabilitätsdaten werden dann für eine weitere Vollzellsimulation verwendet, bei der die GDL in geeignete Segmente aufgeteilt wird (Schritt 4). Erste Resultate zeigen einen wesentlichen Einfluss der lokalen Verhältnisse auf das Verhalten der Zelle.



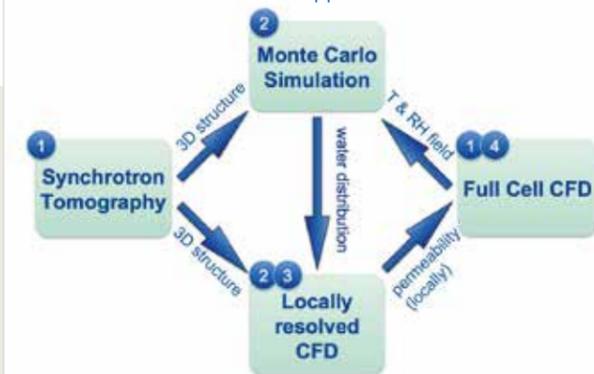
// Feststoffstruktur aus (1), Flüssigwasserverteilung aus (2) als Eingangsdaten für (3). Resultierende Luftdruckverteilung kathodenseitig (aus (3)).  
 // Solid structure from (1), liquid water distribution from (2) as input data for (3). Resulting air pressure distribution on the cathode side (from (3)).

### // Multiscale simulations for realistically describing the gas transport in fuel cells

Whole-cell CFD simulations (Computational Fluid Dynamics) enable realistic descriptions of the cellular operation of low-temperature fuel cells by taking into account the gas and heat transport, electrochemical reactions and the water balance as interrelated processes, and by forecasting the resulting electrical output. Here, localised differences across the surface of the gas distribution field are fully considered when selecting a sufficiently fine grid. Most models only describe the porous media in the cell, such as the gas diffusion layer (GDL), integrally and homogeneously, i.e. local differences in the structure and density, such as occur under the gas distribution bars and channels, are ignored. The same applies to the locally very different distribution of the water that forms on the cathode side, which the GDL can partially block.

At ZSW, a multi-scale approach is being developed where, in step 1 (see fig. below), the structure of the GDL is determined taking into account the compression caused by X-rays. In addition, a conventional full-cell simulation for determining the temperature and humidity distribution is also carried out in the cell. In step 2, the data is used to determine the distribution of liquid water in the local structure on a sub-millimetre scale by using Monte Carlo simulations. This input data then enables the local permeability with and without water to be determined on the same structure (step 3). This local permeability data is then used for a further full-cell simulation where the GDL is divided into suitable segments (step 4). The initial results indicate that the local conditions significantly influence the behaviour of the cell.

Idea of the multi-scale model approach

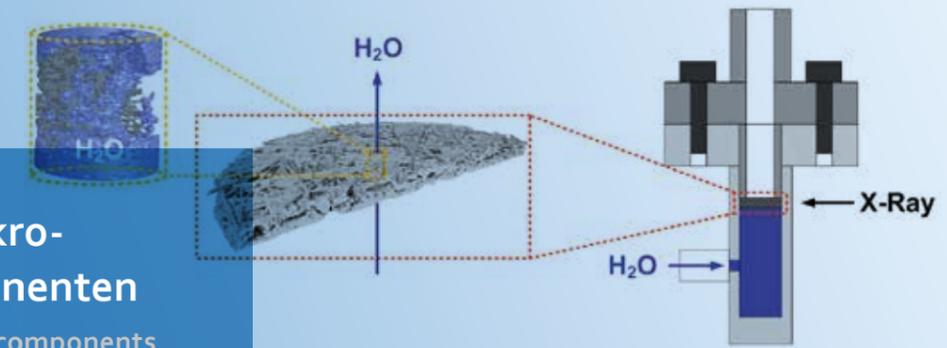


// Zusammenwirken der Simulationen auf mehreren Längenskalen.  
 // Interaction of the simulation methods on multiple length scales.

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

## // Simulation von Mikrostrukturen in Komponenten

Simulating microstructures in components



### // Bestimmung der Wassersättigung von Gasdiffusionslagen zur Simulationsoptimierung

Zur Verbesserung des Gas- und Wassertransports in Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) ist die Kenntnis des Wassersättigungsverhaltens der porösen Materialien, speziell der Gasdiffusionslage (GDL), von entscheidender Bedeutung. Hohe Wassersättigungen führen zu einem verminderten Gas-transport zur katalytisch aktiven Schicht und vermindern so die Leistung der Brennstoffzelle. Es ist zu erwarten, dass bei unterschiedlicher Faserstruktur der GDL sich auch der Sättigungsanteil und die Wasserverteilung ändern.

In CFD-Brennstoffzellensimulationen (Computational Fluid Dynamics) wird diese Unterscheidung bislang jedoch nicht berücksichtigt. Anhand von tomographischen Untersuchungen basierend auf Röntgenstrahlen kann die Wassersättigung von GDLs gemessen und so der Einfluss einer unterschiedlichen Faserstruktur ermittelt werden. Dazu wurde ein spezieller Probenhalter entwickelt, mit dem die Wassersättigung in Abhängigkeit vom angelegten Wasserdruck gemessen werden kann (s. Abb. oben). Mit diesen Daten kann dann eine GDL-spezifische Funktion ermittelt werden, die in den CFD-Simulationen berücksichtigt wird.

Anhand einer Ein-Kanal-Simulation konnte gezeigt werden, dass sich das Verhalten einer kommerziellen GDL stark von den bisherigen Standardwerten unterscheidet. Insbesondere im Stegbereich ist die ermittelte Wassersättigung mit der GDL-spezifischen Funktion um ein Vielfaches höher, als mit den Standardwerten vorhergesagt wurde (s. Abb. unten). Mit der neu entwickelten Methode ist es damit möglich, die Wassersättigung GDL-spezifisch zu bestimmen und damit das Simulationsergebnis zu verbessern.

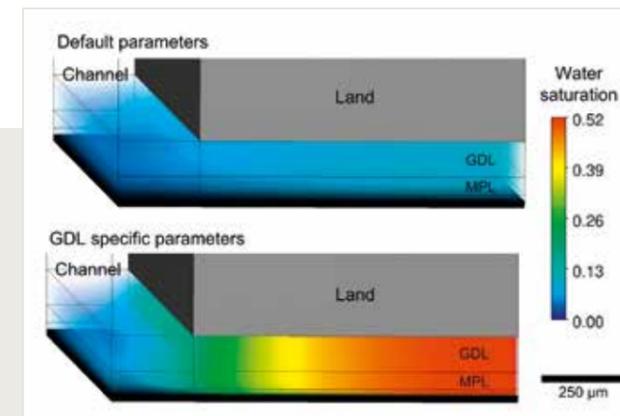
// Messaufbau zur Bestimmung der Wassersättigung von GDLs mittels Röntgenstrahlen.  
 // X-ray measurement of water saturation in GDL.

### // Determining the water saturation of gas diffusion layers for optimising simulations

To improve the gas and water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs), it is essential to have knowledge of the water-saturation behaviour of the porous materials, especially the gas diffusion layer (GDL). High water saturations reduce the gas transported to the catalytically active layer and thus reduce the performance of the fuel cell. The saturation component and the water distribution are also likely to change with different fibre structures in the GDL.

However, this distinction has not yet been taken into consideration in CFD (Computational Fluid Dynamics) fuel cell simulations. Using tomographic investigations based on X-rays, the water saturation of GDLs can be measured and thus the influence of different fibre structures determined. For this purpose, a special sample holder has been developed with which the water saturation can be measured as a function of the applied water pressure (see fig. above). This data can then be used to determine a GDL-specific function, which is taken into account in the CFD simulation.

Using a single-channel simulation, it has been possible to show that the behaviour of a commercial GDL considerably varies from the current default values. In particular, the water saturation in the rib area determined with the GDL-specific function is considerably higher than that predicted using the default values (see fig. below). The newly developed method therefore makes it possible to determine the water saturation GDL-specifically, and thus improve the simulation results.



// Vergleich der Wassersättigungsverteilung unter Berücksichtigung von GDL-Standardparametern und individuell ermittelten Parametern für eine kommerzielle GDL.  
 // Comparison of the water saturation distribution taking into account GDL default parameters and individually determined parameters for a commercial GDL.

// Dr. Jan Haußmann  
 E-mail: jan.haussmann@zsw-bw.de  
 Phone: +49(0)731 95 30-209

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

### // Unsere Kernkompetenzen

#### Brennstoffzellentests

Wir betreiben 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>el</sub> auch nach der DIN EN 62282-2 geprüft werden. Unsere Industriepartner nutzen streng vertraulich durchgeführte Tests und das langjährige Know-how unserer Experten, um ihre Produkte besser zu verstehen, weiterzuentwickeln und deren Sicherheit nachzuweisen. In öffentlich geförderten Projekten werden wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

#### Brennstoffzellensysteme

Langjährige Erfahrung bildet unsere Basis für die 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.

#### Reformer für flüssige Brennstoffe

Flüssige Brennstoffe wie Methanol sind aufgrund ihres hohen Energieinhaltes und der einfachen Speicherung von großem Interesse. Wir entwickeln hochkompakte Komponenten für die Reformierung dieser Brennstoffe und die Aufbereitung der Edukte und wir bauen komplette Reformersysteme.

### // Our main focus

#### Fuel cell tests

In order to characterise fuel cell stacks, systems and system components cost-efficiently in 24/7 operation, we run 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>el</sub> were tested in accordance with DIN EN 62282-2. Our 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.

#### Fuel cell systems

Our 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.

#### Reformer for liquid fuels

There is considerable interest in liquid fuels like methanol because of their high energy content and easy storage. We develop highly compact components for reforming these fuels and preparing the reactants and we also build complete reforming systems.

## // Ulmer H<sub>2</sub>-Tankstelle

Hydrogen filling station in Ulm, Germany

### // Begleitforschung zu Wasserstoff- und Betankungsqualität

Wasserstoff (H<sub>2</sub>) als Energieträger ist regenerativ in großen Mengen wirtschaftlich herstellbar und eignet sich u. a. als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Diese Fahrzeuge zeichnen sich aufgrund des hohen Energieinhaltes von H<sub>2</sub> durch hohe Reichweiten (400–700 km) sowie durch einen Betankungsvorgang (Druckgas) innerhalb weniger Minuten aus. In Deutschland sind Brennstoffzellenfahrzeuge auf dem Vormarsch, erste Modelle sind seit 2015 auf dem Markt. Die insgesamt 20 Wasserstofftankstellen im Raum Hamburg, Berlin und Stuttgart werden bundesweit bis Anfang 2016 auf 50 Zapfsäulen ausgebaut. Eine davon kommt ans ZSW nach Ulm. Dabei unterstützt das Fachgebiet ECS die Einführung der neuen Betankungstechnologie bei mehreren Themen:

#### Abnahme von Wasserstofftankstellen

Wasserstofftankstellen müssen vor ihrer Erstinbetriebnahme abgenommen und auch danach regelmäßig überprüft werden. Am ZSW wurde dafür ein zugelassenes Gerät zur Abnahme von Wasserstofftankstellen nach der Richtlinie SAE J2601 entwickelt.

#### Bestimmung der Qualität von Wasserstoffproben

Bei der Herstellung und dem Transport von Wasserstoff können Verunreinigungen, beispielsweise durch Kohlenmonoxid, auftreten, die die Brennstoffzellen schädigen. Die zulässigen Grenzwerte sind u. a. in der Norm SAE J2719 definiert. Am ZSW wird gegenwärtig ein Gerätepark zur Analyse dieser Bestandteile in Wasserstoff aufgebaut.

#### Brennstoffzellen als Wasserstoffqualitätssensor

In elektrochemischen Schlüsselversuchen wurde bereits die Tauglichkeit spezieller Brennstoffzellen als Wasserstoffqualitätssensor nachgewiesen. Dieses Prinzip kann als Onlinemonitor für die kostengünstige Überwachung der Wasserstoffqualität an Tank- und Abfüllstellen Anwendung finden.

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

Hydrogen (H<sub>2</sub>) as an energy source is renewable, can be produced economically in large quantities and is, among other things, suitable as a fuel for fuel cell vehicles. Due to the high energy content of H<sub>2</sub>, fuel cell vehicles are characterised by long ranges (400–700 km) and their refuelling method (compressed gas) that only takes a few minutes. In Germany, fuel cell vehicles are on the rise, and first models have been on the market since 2015. A total of 20 hydrogen filling stations are located around Hamburg, Berlin and Stuttgart, with 30 more to be built by early 2016. One of these will be at ZSW, in Ulm. The ECS department is supporting the implementation of the new refuelling technology in several areas:

#### Approval of hydrogen filling stations

Prior to initial commissioning, hydrogen filling stations need to be approved, with periodic follow-up inspections. To this end, ZSW developed an approved device for inspecting hydrogen filling stations pursuant to Directive SAE J2601.

#### Determining the quality of hydrogen samples

When producing and transporting hydrogen, impurities, such as carbon monoxide, can occur that may damage the fuel cell. The permissible limits are specified by the SAE J2719 standard. An equipment fleet for the analysis of these substances in hydrogen is currently being built at ZSW.

#### Fuel cells as a hydrogen quality sensor

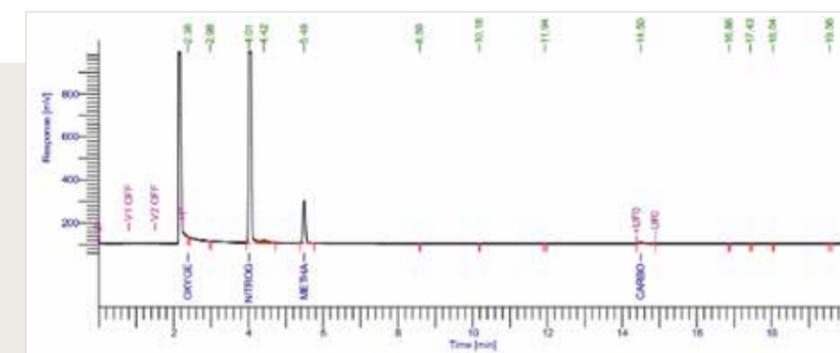
In electrochemical key tests, the suitability of special fuel cells to measure the hydrogen quality had already been proven. This principle could be implemented as an online monitor for the cost-effective monitoring of hydrogen quality at petrol stations and filling points.



*„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.”*



// Analyse der Gaszusammensetzung einer exemplarischen Wasserstoffprobe.  
// Analysis of the gas composition of a showcase hydrogen sample.

// Markus Jenne

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



// Öffentlichkeitsarbeit  
Public Relations



**// 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 2015.

The issues we tackle are complex. This is why we deliver transparent, independent information to the economic, political and social arenas. Our reports facilitate understanding and evaluation of new technologies, which leads to support for their implementation and a greener energy supply for the future. The following review provides you with an insight into our events and public relations work in 2015.

**// Bundesrats- und Europaminister Peter Friedrich zu Gast in Ulm**  
Der baden-württembergische Minister für den Bundesrat, Europa und internationale Angelegenheiten, Peter Friedrich, besuchte am 6. August das Batteriesicherheitstestzentrum und die Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL) am Ulmer ZSW. Anlass seines Besuchs war der Austausch mit den ZSW-Vorständen Prof. Dr. Werner Tillmetz und Prof. Dr. Frithjof Staiß sowie weiteren Wissenschaftlern über aktuelle Entwicklungstrends bei Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland und im internationalen Wettbewerb. Zum Kern der Diskussion zählten Strategien und Handlungsoptionen zur Etablierung einer Zellproduktion und deren positive Auswirkungen auf die Wertschöpfung und neue Arbeitsplätze in Baden-Württemberg.

**// Minister of the German Council and Europe Peter Friedrich visits Ulm**  
On 6 August, Baden-Württemberg's Minister for the German Federal Council, Europe and International Affairs, Peter Friedrich, visited the Battery Safety Test Centre and the Research Platform for the Industrial Production of Lithium-Ion Cells (FPL) at ZSW in Ulm. The occasion for his visit was a meeting with ZSW executives Prof. Dr Werner Tillmetz and Prof. Dr Frithjof Staiß and other scientists on the latest development trends in lithium-ion batteries in Germany and international competition. The debate focused on strategies and courses of action to establish cell production and its positive impact on added value and new jobs in Baden-Württemberg.

**// Energiepolitisches Forum: die Folgen der Weltklimakonferenz für die Landespolitik**  
Die auf der Weltklimakonferenz in Paris formulierten Vorgaben betreffen auch die Bundesländer und Kommunen. Welche Herausforderungen damit verbunden sind, beleuchtete das „Energiepolitische Forum“ im Stuttgarter Haus der Geschichte. Dazu hatten die Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg (KEA) und das ZSW eingeladen. Prof. Dr. Frithjof Staiß und KEA-Geschäftsführer Dr. Volker Kienzlen erläuterten die Zusammenhänge in einem gemeinsamen Impulsvortrag und diskutierten anschließend mit den energiepolitischen Sprechern der Landtagsfraktionen und dem Publikum. Im voll besetzten Otto-Borst-Saal entwickelte sich

**// Energy Policy Forum: the consequences of the Global Climate Conference for state policy**  
The demands stated at the Global Climate Conference in Paris affect the Federal States and municipalities. The "Energy Policy Forum" in Stuttgart's "Haus der Geschichte" looked at the challenges which result from this. Baden-Württemberg's Climate Protection and Energy Agency (KEA) and ZSW hosted the event. Prof. Dr Frithjof Staiß and KEA Managing Director Dr Volker Kienzlen explained the context in a joint keynote speech. They then discussed the topic with the energy policy spokespeople of the state parliamentary parties and the audience. A lively discussion on the role and responsibility of politicians and citizens

// Europaminister Friedrich (2. v. l.) lässt sich von ZSW-Vorstand Tillmetz (l.) und FPL-Leiter Brugger (r.) die Forschungsplattform für die Produktion von Lithium-Ionen-Batterien in Ulm zeigen.  
// Minister for Europe Friedrich (2<sup>nd</sup> from left) receives a tour of Ulm's Research Platform for the Production of Lithium-Ion Batteries from ZSW Executive Tillmetz (left) and FPL Head Brugger (right).



eine lebhaft geführte Diskussion über die Rolle und Verantwortung von Politik und Bürgern bei der Energiewende. Zuvor hatte Ministerialdirektor Helmfried Meinel vom baden-württembergischen Umweltministerium ein Grußwort gesprochen.

in the energy transition developed in the packed Otto Borst Hall. Before this, Helmfried Meinel, Director General of the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg, opened the event with a speech.

**// Verleihung „Leitstern Energieeffizienz“ Baden-Württemberg**  
Aus dem diesjährigen Wettbewerb „Leitstern Energieeffizienz“ ist der Landkreis Böblingen als Sieger hervorgegangen, nachdem er im vorigen Jahr den dritten Platz belegt hatte. Zweiter wurde 2015 erneut der Rems-Murr-Kreis, Dritter der Zollernalbkreis. Entscheidend für die Bewertung der Kreise im Wettbewerb sind die Maßnahmen und Aktivitäten, die sie derzeit bei der Energieeffizienz umsetzen, und die damit erzielten Erfolge. Dafür hat das Stuttgarter ZSW einen Kriterienkatalog entwickelt. Neben der Bewertung und Auszeichnung einzelner herausragender Kreise dient der „Leitstern Energieeffizienz“ vor allem dazu, erfolgreiche Effizienzstrategien und -modelle für andere zugänglich zu machen.

**// Presentation of the "Guiding Star in Energy Efficiency" award in Baden-Württemberg**  
The District of Boeblingen emerged as the winner of this year's "Guiding Star in Energy Efficiency" competition, up from third in last year's event. In 2015, second place again went to the Rems-Murr District, and third to the Zollern-alb District. The winners are chosen from the districts in the competition based on the measures and activities they currently implement for energy efficiency and the successes achieved with this. ZSW in Stuttgart developed a catalogue of criteria to help evaluate this. Besides evaluation and recognition of outstanding individual districts, the "Guiding Star in Energy Efficiency" award primarily serves to make successful efficiency strategies and models accessible to others.



// Auf dem Podium diskutierten die Abgeordneten Johannes Stober (SPD), Daniel Renkonen (Grüne) und Paul Nemeth (CDU) sowie Moderator Peter Heilbrunner mit Volker Kienzlen (KEA) und Frithjof Staiß (ZSW) (v.l.n.r.).  
// On the podium, the parliamentarians Johannes Stober (SPD), Daniel Renkonen (Grüne) and Paul Nemeth (CDU) as well as presenter Peter Heilbrunner engaged in a lively debate with Volker Kienzlen (KEA) und Frithjof Staiß (ZSW) (from left).



// Der Marmorsaal im Neuen Schloss bot ein feierliches Ambiente für die Preisverleihung des „Leitsterns Energieeffizienz“.  
// The Marble Hall in the New Palace in Stuttgart provided a festive backdrop for the "Guiding Star in Energy Efficiency" award ceremony.

// Pressegespräch des VDMA Batterieproduktion zur Fachmesse Battery & Storage im eLaB.

// Press interview for VDMA Battery Production at the Battery & Storage trade fair at eLaB.



// SYS-Fachgebietsleiterin Maika Schmidt (links) stellt sich den Fragen einer litauischen Hörfunkjournalistin.

// SYS Department Head Maika Schmidt (left) answers questions from a Lithuanian radio journalist.



## // Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// ZSW-Vorstand Tillmetz auf der NPE in Berlin bei Kanzlerin Merkel.

// ZSW-Vorstand Tillmetz at NPE with German Chancellor Merkel in Berlin.



**// VDMA-Presskonferenz zur Battery & Storage am ZSW Ulm**  
Am 2. Juli diskutierten auf der VDMA-Fachpressekonferenz der Battery & Storage namhafte Industrievertreter des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus und ZSW-Vorstand Prof. Tillmetz mit interessierten Fachjournalisten über die Marktentwicklung im Batteriesektor, wie die Herausforderungen der Batterieproduktion bewältigt werden sollen und über die Stuttgarter Batteriemesse. Gesprächspartner waren Siemens, die ThyssenKrupp System Engineering GmbH, die TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, die VDMA Batterieproduktion, KUKA Industries und die F & K Delvotec Bondtechnik GmbH.

**// VDMA press conference during Battery & Storage at ZSW Ulm**  
On 2 July, renowned representatives from the German mechanical and plant engineering industries and ZSW executive Tillmetz debated market development in the battery sector, how the challenges facing battery production can be overcome and the Stuttgart battery trade fair with interested specialised journalists at the VDMA specialist press conference for the Battery & Storage trade fair. Participants included Siemens, ThyssenKrupp System Engineering GmbH, TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, VDMA Battery Production, KUKA Industries and F & K Delvotec Bondtechnik GmbH.

**// Besuch zweier internationaler Pressedelegationen am ZSW**  
Nicht nur die deutsche Energiewende im Allgemeinen findet in vielen Ländern weltweit große Beachtung; auch die angewandte Forschung am ZSW rückt zunehmend in den internationalen Fokus. So interessieren sich immer mehr ausländische Medien für die Projekte und Konzepte aus Stuttgart und Ulm. Anfang Oktober waren gleich zwei Delegationen am Stuttgarter Standort zu Gast: Zunächst eine Gruppe indischer Journalisten, die für die wichtigsten und auflagenstärksten Tageszeitungen des Landes über die Systemanalyse und Dünnschicht-Photovoltaik-Forschung des ZSW berichteten. Es folgte eine Gruppe mit Vertretern namhafter Medien u. a. aus Großbritannien, den Niederlanden, Spanien, Portugal, Litauen, der Türkei und Ägypten. Power-to-Gas und die nachhaltige Mobilität der Zukunft waren hier die thematischen Schwerpunkte.

**// Two international press delegations visit ZSW**  
Not only the German energy transition in general has received a lot of attention in many countries; the applied research at ZSW is increasingly attracting international interest. For example, more and more foreign media outlets are expressing interest in the projects and concepts from Stuttgart and Ulm. In early October, not one but two delegations visited the Stuttgart facility: first, a group of Indian journalists, reporting on ZSW's system analysis and thin film photovoltaic research for the country's most important and high-circulation daily newspapers. They were followed by a group of representatives from renowned media outlets, e.g. from Great Britain, the Netherlands, Spain, Portugal, Lithuania, Turkey and Egypt. This delegation focused on Power-to-Gas and sustainable mobility of the future.

**// Nationale Konferenz Elektromobilität in Berlin**  
Die Nationale Plattform Elektromobilität (NPE) wurde 2010 als strategische Plattform für die Akteure aus Industrie, Wissenschaft, Politik, Gewerkschaften und Verbänden gegründet. Die NPE berichtet der Bundesregierung regelmäßig über die Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität. In sieben Arbeitsgruppen mit hochrangigen Experten werden Empfehlungen zur Umsetzung des Regierungsprogramms Elektromobilität erarbeitet. ZSW-Vorstand Tillmetz berichtete am 15. Juni in der Arbeitsgruppe 2 „Batterietechnologie“ und präsentierte die Chancen und Erfolge beim Aufbau einer deutschen Zellproduktion mit der „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Batterien (FPL)“ am ZSW in Ulm hinsichtlich industrieller Nutzung sowie der Einbindung in öffentliche Förderprogramme.

**// National Electromobility Conference in Berlin**  
The German National Platform for Electric Mobility (NPE) was founded in 2010 as a strategic platform for stakeholders from industry, science, politics, trade unions and associations. NPE regularly reports to the German Federal Government on developments in the e-mobility sector. Seven working groups with high-ranking experts develop recommendations to implement the government's e-mobility programme. On 15 June, ZSW Executive Tillmetz reported in working group 2 "Battery Technology" and presented the opportunities and successes in establishing German cell production with the "Research platform for the industrial production of lithium-ion batteries (FPL)" at ZSW in Ulm for industrial use and integration in public subsidy programmes.

**// Korean-German Electromobility Forum in Berlin**  
Zum „Korean-German Electromobility Forum“ im Rahmen der 10. Asien-Pazifik-Wochen 2015 in Berlin haben sich deutsche Experten der Elektromobilität mit Kollegen aus Südkorea ausgetauscht. Die Veranstaltung am 19. Mai wurde vom „Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT)“ und der Berliner Agentur für Elektromobilität eMO in Kooperation mit der Botschaft der Republik Korea organisiert. Thema war der Austausch über Best-Practice-Beispiele sowie Potenziale für eine künftige Zusammenarbeit. ZSW-Vorstand Tillmetz stieß mit seinem Vortrag über aktuelle ZSW-Forschungsergebnisse zum Thema „Industrielle Produktionsforschung für Lithium-Ionen-Zellen“ auf breites Interesse.

**// Korean-German Electromobility Forum in Berlin**  
During the "Korean-German Electromobility Forum" as part of the 10<sup>th</sup> Asia-Pacific Weeks 2015 in Berlin, German e-mobility experts discussed their experience with experts from South Korea. The event on 19 May was organised by the "Korea Evaluation Institute of Industrial Technology KEIT" and eMO, the Berlin Electromobility Agency, in cooperation with the embassy of the Republic of Korea. They discussed best practice examples and potential for future cooperation. ZSW executive Tillmetz' presentation on the latest ZSW research findings on "Industrial production research for lithium-ion cells" was received with great interest.

**// Praxistest Callux erfolgreich beendet**  
Der im September 2008 vom damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung gestartete und vom ZSW koordinierte Praxistest „Callux – Brennstoffzellen fürs Eigenheim“ endet mit der Markteinführung der innovativen Anlagen. In den vergangenen sieben Jahren haben die beteiligten Hersteller gemeinsam mit Unternehmen aus der Energiewirtschaft fast 500 Brennstoffzellen-Heizgeräte installiert, betrieben und messtechnisch begleitet. Dabei konnten deren hohe Zuverlässigkeit sowie erhebliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen gegenüber Brennwertechnik und Strombezug aus dem Netz nachgewiesen werden. Weitere Informationen unter [www.callux.net/home.Medien.html](http://www.callux.net/home.Medien.html).

**// Callux field test successfully completed**  
The "Callux Domestic Fuel Cell" field test launched in September 2008 by the then Federal Ministry of Transport, Construction and Urban Development ended with the market launch of the innovative systems. In the past seven years, the manufacturers involved have jointly installed, operated and measured nearly 500 fuel cell heating systems together with companies from the energy industry. They demonstrated their great reliability and significant CO<sub>2</sub> savings compared with condensing boiler technology and grid-sourced electricity. For further information, visit [www.callux.net/home.Medien.html](http://www.callux.net/home.Medien.html).



// Austausch deutscher und koreanischer E-Mobilitäts-Experten beim Electromobility Forum in Berlin.

// German and Korean e-mobility experts meet at the Electromobility Forum in Berlin.



// Rund 160 Gäste aus Politik, Wirtschaft und Verbänden kamen zur Callux-Abschlussveranstaltung am 16.11.2015 ins Bundesverkehrsministerium.

// Roughly 160 visiting politicians, businesspeople and representatives of associations came together on 16 November 2015 to the Callux-Event to the German Federal Ministry of Transport.

// Die PV-Systemtechniker des ZSW auf der Intersolar Europe in München.  
 // PV system technicians from ZSW at Intersolar Europe in Munich.



## // Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Delegation des baden-württembergischen Ministers für Verkehr und Infrastruktur Winfried Hermann am ZSW-Stand auf der Battery & Storage.  
 // Delegation of the Baden-Württemberg Minister of Transport and Infrastructure Winfried Hermann at the ZSW booth at Battery & Storage.



// Prof. Dr. Frithjof Staiß präsentiert dem MFW die Forschung des ZSW im Zukunftsfeld Nachhaltige Mobilität.  
 // Prof. Dr. Frithjof Staiß presents ZSW's research in the future area of sustainable mobility to MFW.



### // Das ZSW war 2015 auf folgenden Messen vertreten:

Fuel Cell Expo, Tokio	25.–27.2.2015
22. DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum	5.3.2015
Batterien und Ladekonzepte, München	
30. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	11.–13.3.2015
MobiliTec 2015 – Baden-Württemberg Pavillon, Hannover Messe	13.–17.4.2015
Intersolar Europe, München	10.–12.6.2015
European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam	15.–17.9.2015
Fachmesse Battery & Storage 2015, Stuttgart	12.–14.10.2015

### // Fuel Cell Expo in Tokio, Japan

Die FC Expo in Tokio ist im asiatischen Raum die größte internationale Messe und Konferenz zum Thema Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie. Während der „World Smart Energy Week“ finden noch weitere relevante Messen statt, u. a. die PV EXPO, PV SYSTEM EXPO, BATTERY JAPAN. 2015 beteiligte sich das Ulmer ZSW am 7<sup>th</sup> German Pavilion, um sich mit seiner Expertise zu Lithium-Ionen-Batterien und Brennstoffzellen im internationalen Umfeld von Herstellern, Entwicklern, Forschungsinstituten, Automobilisten und anderen branchenaffinen Unternehmen zu positionieren.

### // Hannover Messe MobiliTec 2015

Zum 15. Mal auf der Hannover Messe, aber zum ersten Mal im Baden-Württemberg-Pavillon präsentierte sich das ZSW im Rahmen der MobiliTec mit den Themen Batterien und Brennstoffzellen. Kernthemen des Gemeinschaftsstandes waren hybride und elektrische Antriebe, mobile und stationäre Energiespeicher, alternative Kraft- und Brennstoffe sowie ganzheitliche Mobilitätstechnologie-Lösungen. Die Neupositionierung im Netzwerk des Landes Baden-Württemberg bot die Gelegenheit zum Expertengespräch, die rege genutzt wurde. Auch das Medieninteresse war groß, nicht zuletzt wegen der Pressemeldung über einen vom ZSW mitentwickelten 95-kW-Brennstoffzellen-Stack, dem eine wöchentliche Laufleistung von 5.600 km nachgewiesen werden konnte.

### // In 2015, ZSW was represented at the following trade fairs:

Fuel Cell Expo, Tokyo	25–27/2/2015
22 <sup>nd</sup> DESIGN&ELECTRONIC Developer Forum, Munich	5/3/2015
30 <sup>th</sup> Symposium on Photovoltaic Solar Energy, Bad Staffelstein	11–13/3/2015
MobiliTec 2015 – Baden-Württemberg Pavillon, Hanover Industrial Trade Fair	13–17/4/2015
Intersolar Europe, Munich	10–12/6/2015
European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam	15–17/9/2015
Battery & Storage trade fair 2015, Stuttgart	12–14/10/2015

### // Fuel Cell Expo in Tokyo, Japan

The FC Expo in Tokyo is the largest international trade fair and conference on hydrogen and fuel cell technology in Asia. The “World Smart Energy Week” also includes other relevant trade fairs, e.g. PV EXPO, PV SYSTEM EXPO, BATTERY JAPAN. In 2015, ZSW Ulm took part in the 7<sup>th</sup> German Pavilion, to position itself in the international environment of manufacturers, developers, research institutes, automotive companies and other industry-related companies with its expertise on lithium-ion batteries and fuel cells.

### // Hanover Industrial Trade Fair MobiliTec 2015

For the 15<sup>th</sup> time at the Hanover Industrial Trade Fair, but for the first time in the Baden-Württemberg Pavilion, ZSW showcased its work on batteries and fuel cells at MobiliTec. Key topics at the joint booth were hybrid and electric drives, mobile and stationary energy storage systems, alternative power sources and fuels as well as holistic mobility technology solutions. ZSW's repositioning in the network of the Federal State of Baden-Württemberg offered an opportunity for discussions among experts which was actively used. The media interest was also high, not least because of the press release on a 95 kW fuel cell stack, jointly developed by ZSW, which successfully achieved a weekly mileage of 5,600 km.

### // Intersolar Europe, München

Auf dem baden-württembergischen Gemeinschaftsstand bei der Intersolar Europe präsentierten die Photovoltaik-Systemtechniker ihre Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen im Bereich der Solarmodulcharakterisierung. Langzeitstabilität, Ertragsprognosen, Anlagengutachten sowie die Steuerung des Eigenverbrauchs im Zusammenhang mit Solarstromspeichern waren wichtige Themen der Fachgespräche.

### // World of Energy Solutions (WES)

Vom 12. bis 14. Oktober fand die WES zu den Themen Energieerzeugung, Speichersysteme und Mobilitätslösungen mit der Messe Battery & Storage, der f-cell-Konferenz und der e-mobility solutions statt. Das ZSW gab hier einen Überblick über seine Leistungen im Batteriesicherheits- und -testzentrum sowie in der Forschungsplattform für Lithium-Ionen-Zellen. Eine Delegation des baden-württembergischen Ministers für Verkehr und Infrastruktur Winfried Hermann machte am ZSW-Stand halt und informierte sich über die Batterieproduktion in Ulm. Im Rahmen der parallel stattfindenden Konferenz „f-cell“ beteiligten sich ZSW-Wissenschaftler mit Vorträgen zu Brennstoffzellen. Den zweiten Tag eröffnete Vorstand Prof. Tillmetz mit einer Key-Note zu „Quo Vadis Batteries“.

### // Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist nicht zuletzt aufgrund der attraktiven Themen des Instituts weiterhin erfolgreich. 2015 wurde insgesamt 1.611-mal über das ZSW berichtet – das zweitbeste Ergebnis seit Beginn der Zählung im Jahr 2006. Wie in den vergangenen Jahren war das Institut auch 2015 mehrmals in den wichtigsten regionalen und überregionalen Leitmedien vertreten, z. B. *Süddeutsche Zeitung*, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, *Wirtschaftswoche*, *Stuttgarter Zeitung*, *Handelsblatt* und *SWR*.

Für die Medien besonders interessante ZSW-Pressemitteilungen:

- > Mehr als 740.000 Autos weltweit fahren mit Strom
- > Anteil der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch 2015 steigt voraussichtlich auf 33 Prozent
- > Batterien für Elektroautos: Industrielle Produktion in Deutschland rückt näher
- > Mehr Lichtdurchlässigkeit im blauen Wellenlängenbereich (Cadmiumfreie Dünnschicht-Solarzellen)
- > Erneuerbarer Wasserstoff für die Mobilität der Zukunft

### // Intersolar Europe, Munich

At the joint Baden-Württemberg stand at Intersolar Europe, the photovoltaics system technicians presented their research and development services for solar module characterisation. Long-term stability, yield forecasts, system reports and management of own consumption in conjunction with solar power storage systems were important topics of the meetings.

### // World of Energy Solutions (WES)

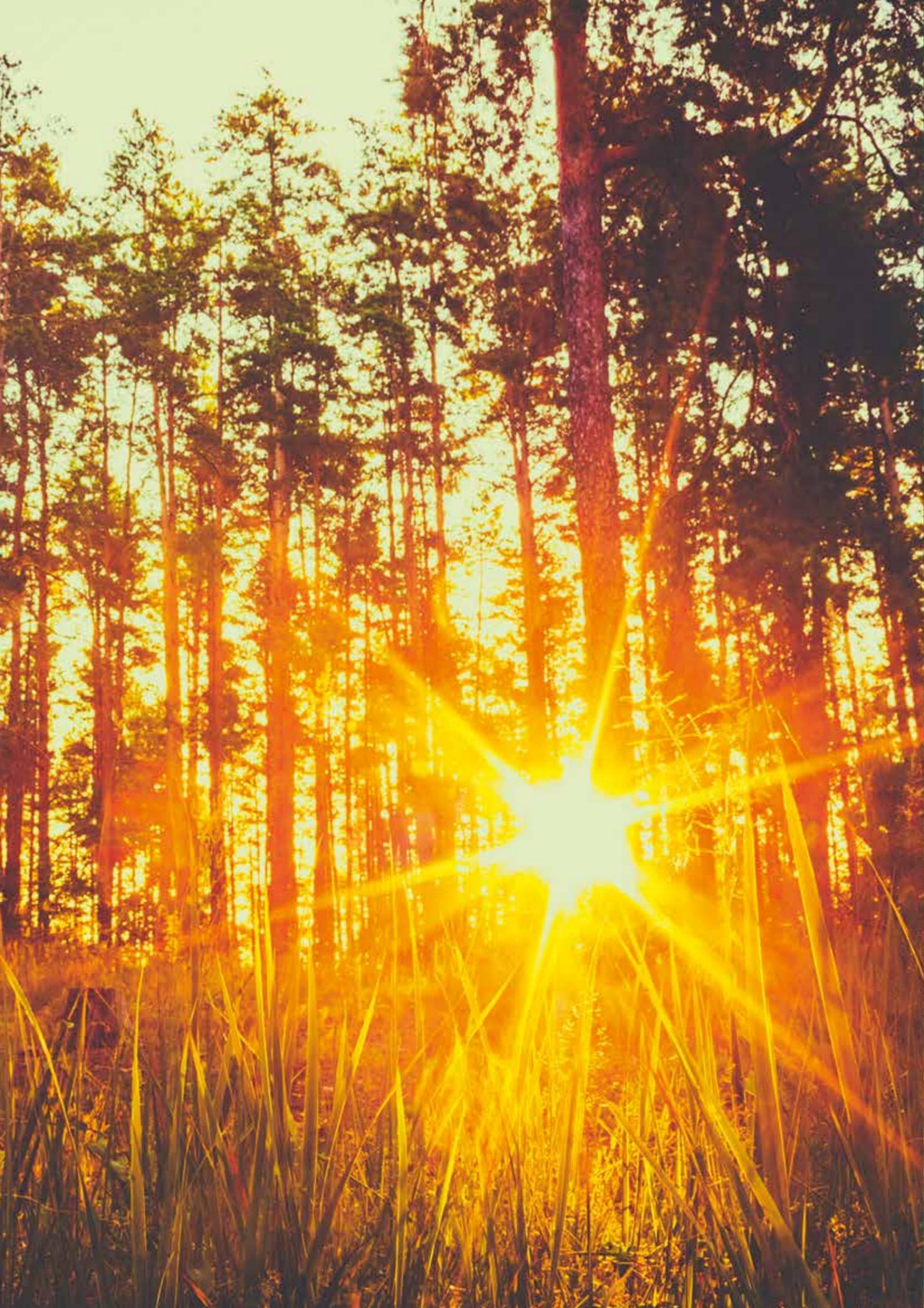
WES was held from 12 to 14 October, on the topics of power generation, storage systems and mobility solutions with the Battery & Storage trade fair, the f-cell conference and “e-mobility solutions”. There, ZSW gave an overview of its services in the battery safety and test centre and in the research platform for lithium-ion cells. A delegation from Baden-Württemberg's Minister for Transport and Infrastructure, Winfried Hermann, visited the ZSW stand and learned about battery production in Ulm. During the “f-cell” conference held at the same time, scientists from ZSW gave presentations on fuel cells. ZSW executive Prof. Tillmetz opened the second day with a keynote speech entitled “Quo Vadis Batteries”.

### // Media relations

Not least because of the attractive issues dealt with by the institute, ZSW has been able to continue its successful public relations work. In 2015, ZSW was reported about 1,611 times – the second-highest ever result since counting started in 2006. As in previous years, the institute was repeatedly mentioned in major regional and national mainstream media outlets in 2015 such as *Süddeutsche Zeitung*, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, *Wirtschaftswoche*, *Stuttgarter Zeitung*, *Handelsblatt*, *SWR* etc.

ZSW press releases particularly interesting for the media:

- > More than 740,000 Cars Worldwide Powered by Electricity
- > German Renewables' Share of Electricity Consumption 2015 Expected to Rise to 33 Percent
- > Batteries for Electric Cars: Industrial Production in Germany is Nearing
- > Enhanced Transparency in the Blue Wavelength Range (Cadmium-free Thin-film Solar Cells)
- > Renewable Hydrogen for the Mobility of the Future



// Dokumentation  
Documentation

# // Finanzielle Entwicklung Financial development



## // Einnahmen – Ausgaben

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 33,8 Mio. Euro und damit deutlich unter dem Wert des Vorjahres. Wesentliche Ursache dafür waren hohe Einnahmen in 2014 aus öffentlichen Zuwendungen für den Aufbau der Forschungsplattform für Lithium-Ionen-Zellen in Ulm.

Die Einnahmen aus der Auftragsforschung erreichten mit 10,5 Mio. Euro einen neuen Höchststand und lagen 3 % über dem Vorjahreswert.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2015 um 0,1 Mio. auf 4,4 Mio. Euro.

## // Revenue – expenditure

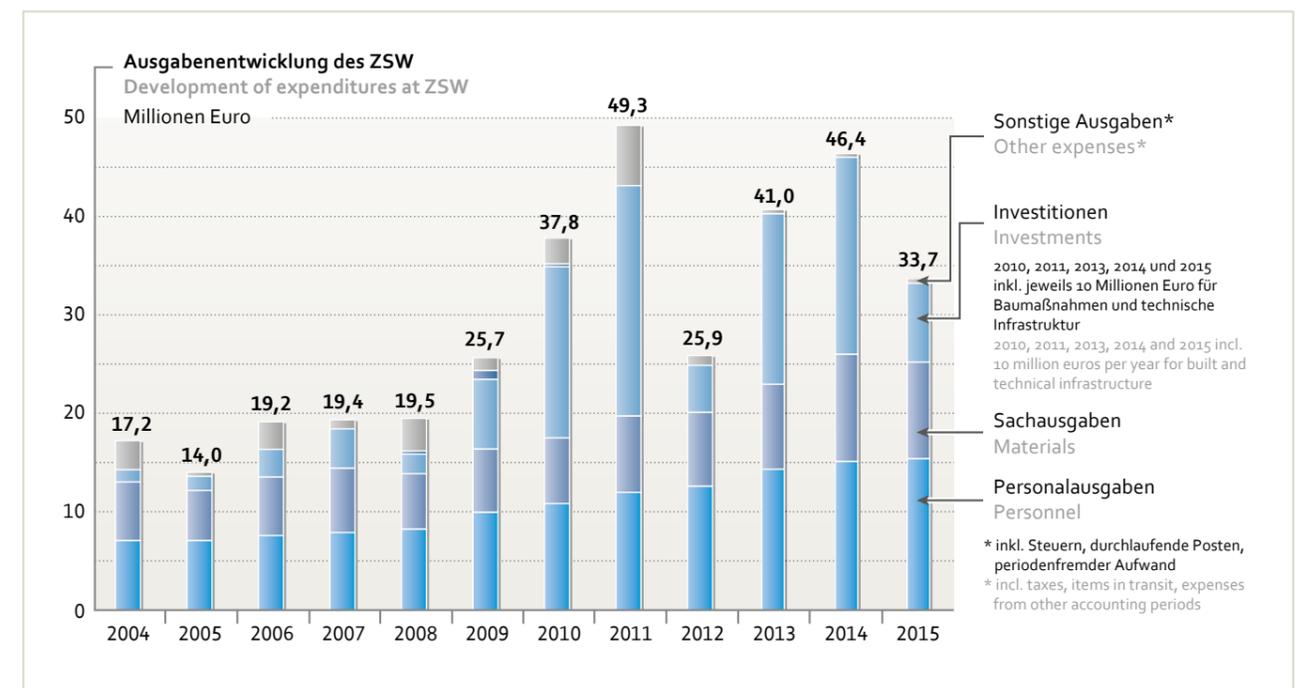
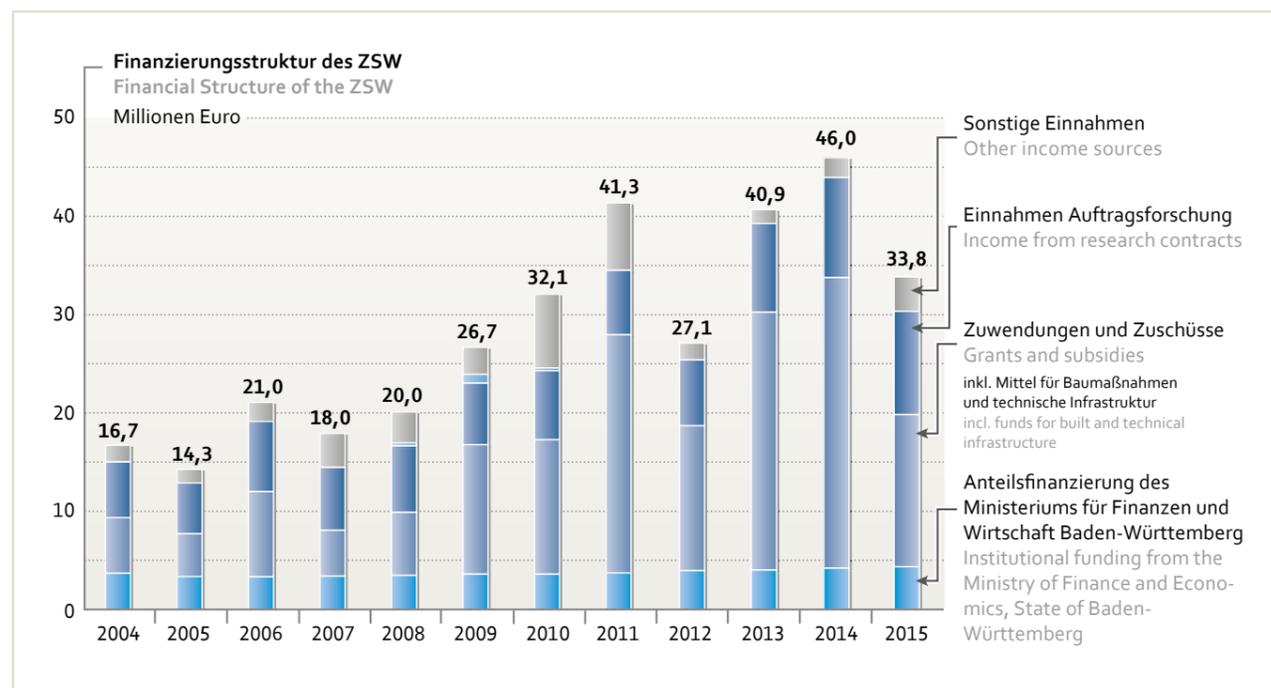
In the past year, the income volume from normal business activities was 33.8 million euros and thus considerably lower than in the previous year. This is mainly due to the fact that more revenue was received from public grants for constructing the research platform for lithium-ion cells in Ulm in 2014.

The revenue from the contract research reached a new record of 10.5 million euros, or 3% more than the previous year's figure.

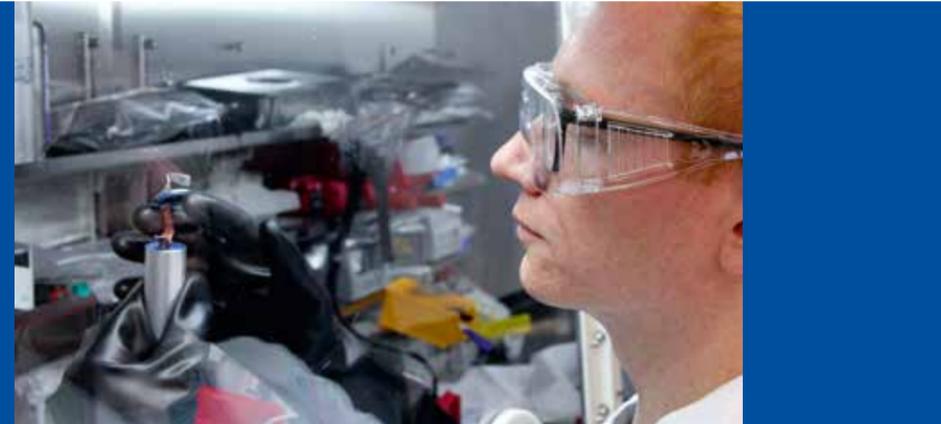
The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased by 0.1 million to 4.4 million euros in 2015.

Das korrespondierende Ausgabenvolumen reduzierte sich gegenüber dem Vorjahr auf 33,7 Mio. Euro, im Wesentlichen durch den Abschluss der Investitionsausgaben für den Aufbau der Forschungsplattform für Lithium-Ionen-Zellen. Die Personalausgaben stiegen aufgrund einer Tarifierhöhung sowie eines leichten Anstiegs der Personalkapazität.

The corresponding expenditure volume was reduced to 33.7 million euros relative to the previous year, which was mainly due to the end of investment expenditure on constructing the research platform for lithium-ion cells. Due to a collective pay increase and a slight rise in personnel capacity, personnel expenditure 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 207 Vollzeitstellen auf 209 leicht erhöht. Das entspricht einer Mitarbeiterzahl von 228. Mit einem Anteil von 82 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau. Zum Jahresende waren 24 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ausländischer Staatsangehörigkeit am Institut tätig, das entspricht gut 10 % der Beschäftigten.

Im Berichtszeitraum waren am Institut 59 Frauen beschäftigt. Das entspricht einem Frauenanteil von 26 %, ein Rückgang von knapp 4 % gegenüber dem Vorjahr. Das ZSW bemüht sich, diesen für technisch orientierte Forschungsinstitute typischen geringen Frauenanteil 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.

Die Erhaltung und Förderung der Gesundheit der Mitarbeiter hat einen hohen Stellenwert in unserer Unternehmenskultur. Das betrifft Themen wie Bewegung, Ernährung, Stressmanagement usw. In diesem Rahmen bot das ZSW im Jahr 2015 u. a. Teilnahmen am Einstein-Marathon und -Triathlon sowie verschiedene Workshops an. Auch konnten viele Arbeitsplätze ergonomisch neu eingerichtet werden.

Die Fort- und Weiterbildung mit sowohl fachspezifischen als auch fachübergreifenden Inhalten wurde mit großem Interesse in Anspruch genommen. Insgesamt fanden über 30 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt 130 Beschäftigte teilnahmen.

### // Staff development

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

Employee capacity increased slightly from 207 full-time employees to 209 relative to the previous year. This corresponds to a staff level of 228. 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, 24 staff members with foreign citizenships were employed at the institute, which is equal to almost 10% of the total number of staff.

During the reporting period, the institute employed 59 women. That means that women make up 26% of staff, a decrease of almost 4% relative to the previous year. ZSW strives to increase this low percentage of women employees, which is typical for technically-oriented research institutes, by offering working time models with maximum flexibility, which take the different living situations and interests of women and men into consideration and facilitate a good work-life balance.

In our corporate culture, preserving and promoting the health of our employees plays a very important role. This relates to movement, nutrition, stress management, etc. To this effect, ZSW organised participation in the Einstein marathon and triathlon in 2015, as well as various workshops. Many workplaces were also redesigned to improve their ergonomics.

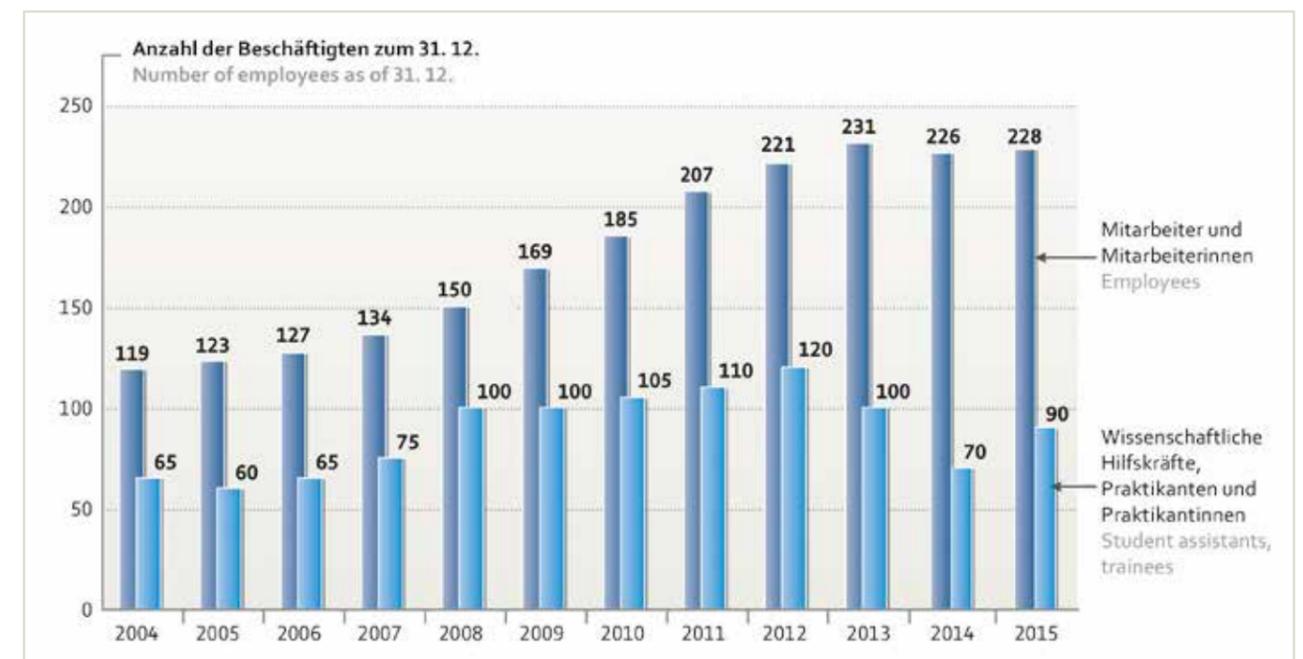
Interest in advanced training and continuing professional development, with both specialist and interdisciplinary content, was high. More than 30 events were held, in which a total of 130 employees took part.

Am Institut wird derzeit eine Auszubildende in der Verwaltung als Kauffrau für Büromanagement ausgebildet.

Einen hohen Stellenwert nimmt die Vernetzung des Instituts mit Hochschuleinrichtungen und die Mitwirkung von ZSW-Mitarbeitern an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie der Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten ein. Daher waren 2015 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. 20 Doktorandinnen und Doktoranden fertigten im Berichtsjahr ihre Dissertation an.

A trainee is currently being trained as an office management clerk in administration.

The institute prioritises networking with universities and 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 employed in accordance with the Federal States' Collective Bargaining Agreement (TV-L), ZSW also employed 90 students and interns in 2015. One third of these had overseas backgrounds. 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

- / Axmann P., Gabrielli G., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Tailoring high-voltage and high-performance  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  cathode material for high energy lithium-ion batteries**; Journal of Power Sources 301 (2016) 151-159; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.10.010>
- / Balasubramanian P., Marinaro M., Theil S., Wohlfahrt-Mehrens M., Jörissen L.; **Au-coated carbon electrodes for aprotic  $\text{Li-O}_2$  batteries with extended cycle life: The key issue of the  $\text{Li-ion}$  source**; Journal of Power Sources 274 (2015) 432-439; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.037>
- / Bantle C. (BDEW), Musiol F.; **Zwischen Autarkie und Energiebilanz – Verfahren zur Abschätzung des Selbstverbrauchs von Photovoltaikstrom**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65. Jg. (2015) Heft 11
- / Bauer M., Günther C., Kasper M., Petzl M. (HIU), Danzer M.; **Discrimination of degradation processes in lithium-ion cells based on the sensitivity of aging indicators towards capacity loss**; Journal of Power Sources 283 (2015) 494-504; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.130>
- / Danzer M., Liebau V. (BMW), Maglia F. (BMW); **Ageing of Li-ion automotive batteries**; Chapter 14 in: Advances in Battery Technology for Electric Vehicles, ed. by B. Scrosati, J. Garche, W. Tillmetz, Woodhead Publishing LTD, June 2015
- / Dsoke S., Fuchs B., Gucciardi E., Wohlfahrt-Mehrens M.; **The importance of the electrode mass ratio in a Li-ion capacitor based on activated carbon and  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$** ; Journal of Power Sources 282 (2015) 385-393; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.079>
- / Enz S., Dao T., Messerschmidt M., Scholta J.; **Investigation of degradation effects in polymer electrolyte fuel cells under automotive-related operating conditions**; Journal of Power Sources 274 (2015) 521-535; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.10.127>
- / Fleischhammer M., Waldmann T., Bisle G., Hogg B.-I., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Interaction of cyclic ageing at high-rate and low-temperatures and safety in lithium-ion batteries**; Journal of Power Sources 274 (2015) 432-439; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.135>
- / Friedlmeier T., Jackson P., Bauer A., Hariskos D., Kiowski O., Würz R., Powalla M.; **Improved photocurrent in  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cells: from 20.8% to 21.7% efficiency with CdS buffer and 21.0% Cd-free**; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 5, No. 5, September 2015; <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2458039>
- / Ghanbari N., Waldmann T., Kasper M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Detection of Li deposition by glow discharge optical emission spectroscopy in post-mortem analysis**; ECS Electrochemistry Letters (2015) 4 (9) A100-A102; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0041509eel>
- / Grashof K. (IZES), Lechtenböhrer S. (WI), Zipp A. (IZES), Jachmann H., Wille-Hausmann B. (FhG-ISE), Reeg M. (DLR); **Monopole, Liberalisierung, Energiewende - Strommarktdesign zwischen Wandel und Konstanz**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65. Jg. (2015) Heft 9
- / Hartmann N. (FhG-ISE), Hussein N. (FhG-ISE), Taumann M., Jülich V. (FhG-ISE), Schlegl T. (FhG-ISE); **Stromerzeugung aus Windenergie (Kapitel 7)**; in M. Wietschel et al. (Hg.), Energietechnologien der Zukunft, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015
- / Haußmann J., Wilhelm F., Enz S., Klages M., Pournemat A., Bergbreiter C., Clark J.S., Duraisamy K., Seidenberger K., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **GDL and MPL characterization and their relevance to fuel cell modelling**; ECS Transactions 69(17) (2015) 1279-1291; <http://dx.doi.org/10.1149/06917.1279ecst>
- / Henning H.-M. (FhG-ISE), Palzer A. (FhG-ISE), Pape C. (FhG-IWES), Borggreffe F. (DLR), Jachmann H., Fishedick M. (WI); **Phasen der Transformation des Energiesystems**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65. Jg. (2015) Heft 1/2
- / Hess S., Wohlfahrt-Mehrens M., Wachtler M.; **Flammability of Li-ion battery electrolytes – Flash point and self-extinguishing time measurements**; Journal of the Electrochemical Society (2015) 162 (2) A1-A14; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0121502jes>
- / Jackson P., Hariskos D., Würz R., Kiowski O., Bauer A., Friedlmeier T., Powalla M.; **Properties of  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cells with new record efficiencies up to 21.7%**; Physica Status Solidi RRL 9, No. 1, 28-31 (2015); <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201409520>
- / Jihao L., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; **Multicell state estimation using variation based sequential Monte Carlo filter for automotive battery packs**; Journal of Power Sources 277 (2015) 95-103; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.010>
- / Kannan A., Kabza A., Scholta J.; **Long term testing of start-stop cycles on high-temperature PEM fuel cell stack**; Journal of Power Sources 277 (2015) 312-316; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.115>
- / Kaymaksiz S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of the solid electrolyte interphase on the performance of redox shuttle additives in Li-ion batteries – A rotating ring-disc electrode study**; Journal of Power Sources 273 (2015) 123-127; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.066>
- / Kiowski O., Friedlmeier T., Würz R., Jackson P., Hariskos D.; **Closing the gap with silicon-wafer-based technologies: Alkali post-deposition treatment improves the efficiency of  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cells**; Photovoltaics International, 29<sup>th</sup> Edition, Sept. 2015 p. 76-80
- / Klee Barillas J., Li J., Günther C., Danzer M.; **A comparative study and validation of state estimation algorithms for Li-ion batteries in battery management systems**; Journal of Applied Energy, 2015, 155, 455-462; <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.102>
- / Klein A., Axmann P., Yada C. (Toyota), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Improving the cycling stability of  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  by surface treatment**; Journal of Power Sources 288 (2015) 302-307; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.145>
- / Kraysberg A. (Technion), Drezner H. (Technion), Auinat M. (Technion), Shapira A. (Technion), Wohlfahrt-Mehrens M., Ein-Eli Y. (Technion); **Atomic layer deposition of a particularized protective  $\text{MgF}_2$  film on a li-ion battery  $\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$  cathode powder material**; ChemNanoMat (2015) 1, 577-585; <http://dx.doi.org/10.1002/cnma.201500149>
- / Lämmle A.; **Dotierung von  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Schichten mit Natrium und Kalium zur Steigerung des Wirkungsgrads**; Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 12.4.2015
- / Lämmle A., Würz R., Powalla M.; **Investigation of the effect of potassium on  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  layers and solar cells**; Thin Solid Films 582 (2015) 27-30; <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.10.088>
- / Lian F. (USTB), Li Y. (USTB), He Y. (USTB), Guan H. (USTB), Yan K. (USTB), Qiu W. (USTB), Chou K.-C. (USTB), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Preparation of LiBOB via rheological phase method and its application to mitigate voltage fade of Li-rich cathode**; RSC Advance (2015) 5, 86763-86770; <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA18520C>
- / Löschel A. (Univ. Münster), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F., Ziesing H.-J. (AGEB); **Stellungnahme zum vierten Monitoring-Bericht für das Berichtsjahr 2014**; Kommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Berlin, Münster, Stuttgart, Nov. 2015
- / Mancini M., Bekaert E. (HIU), Diemant T. (Univ. Ulm), Marinaro M., de Biasi L. (HIU), Behm R. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Study on the stability of  $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$  cathode material in different electrolyte systems for Li-ion batteries**; Journal of Materials Chemistry A (2015) 3, 11807-11816; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2015.07.015>
- / Marinaro M., Balasubramanian P., Gucciardi E., Theil S., Jörissen L., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Importance of reaction kinetics and oxygen crossover in aprotic  $\text{Li-O}_2$  batteries based on a dimethyl sulfoxide electrolyte**; ChemSusChem 8 (2015) 3139-3145; <http://dx.doi.org/10.1002/cssc.201500600>
- / Markötter H. (TU Berlin), Dittmann K. (HZB), Haußmann J., Alink R. (FhG-ISE), Riesemeier H. (BAM), Scholta J., Banhart J. (TU Berlin), Manke I. (HZB); **Influence of local carbon fibre orientation on the water transport in the gas diffusion layer of polymer electrolyte membrane fuel cells**; Electrochemistry Communications 51 (2015) 133-136; <http://dx.doi.org/10.1016/j.elecom.2014.12.013>
- / Memm M., Koentje M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **New high-voltage step at 4.8V in cobalt free manganese based lithium phospho olivines for lithium-ion batteries**; Journal of Power Sources 276 (2015) 382-387; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.065>
- / Musiol F., Bickel P., Nieder T.; **Entwicklung der Erneuerbaren Energien 2014/2015: Windkraft hält die Energiewende auf Kurs**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65. Jg. (2015) Heft 10
- / Petzl M. (HIU), Kasper M., Danzer M.; **Lithium plating in a commercial lithium-ion battery – A low-temperature aging study**; Journal of Power Sources 275 (2015) 799-807; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.11.065>
- / Schnabel T.; **Lösungsprozessierte Kesterit-Absorber zur Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen**; Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 13.4.2015
- / Schnabel T., Abzieher T., Friedlmeier T., Ahlswede E.; **Solution-based preparation of  $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$  for solar cells – comparison of  $\text{SnSe}_2$  and elemental Se as chalcogen source**; IEEE Journal of Photovoltaics Vol. 5, No. 2, 670-675, March 2015 (Proc. of 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Denver, 8-13 June 2014)
- / Secchiaroli M., Gabrielli G. (Univ. of Camerino), Fuchs B., Marassi R. (Univ. of Camerino), Wohlfahrt-Mehrens M., Dsoke S.; **High rate capability  $\text{Li}_3\text{V}_2\text{Ni}_x(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  ( $x=0, 0.05, \text{ and } 0.1$ ) cathodes for Li-ion asymmetric supercapacitors**; Journal of Materials Chemistry A (2015) 3, 11807-11816; <http://dx.doi.org/10.1039/C5TA00976F>
- / Søndergaard M. (Aarhus Univ.), Shen Y. (Aarhus Univ.), Mamakhel A. (Aarhus Univ.), Marinaro M., Wohlfahrt-Mehrens M., Wonsyl K. (Haldor Topsøe), Dahl S. (Haldor Topsøe), Iversen B. B. (Aarhus Univ.);  **$\text{TiO}_2$  nanoparticles for Li-ion battery anodes: mitigation of growth and irreversible capacity using LiOH and NaOH**; Chemistry of Materials 27 (2015) 199-126; <http://dx.doi.org/10.1021/cm503479h>
- / Specht M., Brellachs J.; **Neue Prioritäten bei der Nutzung von Biomasse für die Mobilität**; Biobased Future, Mitteilungsblatt über Biomasse für Energie in Industrie und in einer nachhaltigen Wirtschaft, Nr. 4, BIOENERGY 2020+(Hg.), (2015) S. 18
- / Specht M., Brellachs J., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U.; **Technische Umsetzung der Power-to-Gas-Technologie (P2G®): Erzeugung von Erdgassubstitut durch katalytische Methanisierung von  $\text{H}_2/\text{CO}_2$** ; „Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb – Wege zur klimaneutralen Mobilität“, Richard van Basshuysen (Hg.), Wiesbaden, 2015 S. 143
- / Spiering S., Paetel S., Kessler F., Igalson M. (WUT), Abdel Maksoud H. (WUT); **Copper variation in  $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$  solar cells with indium sulphide buffer layer**; Thin Solid Films 582 (2015) 328-331; <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.027>

## // Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications



### // Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

/ Waldmann T., Geramifard G., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of current collecting tab design on thermal and electrochemical performance of cylindrical lithium-ion cells during high current discharge**; Journal of the Electrochemical Society, in press, available online 31 Dec. 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2015.12.007>

/ Waldmann T., Ghanbari N., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Correlations between electrochemical data and results from post-mortem analysis of aged lithium-ion batteries**; Journal of the Electrochemical Society (2015) 162 (8) A1500-A1505; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0411508jes>

/ Waldmann T., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Optimization of charging strategy by prevention of lithium deposition on anodes in high-energy lithium-ion batteries – Electrochemical experiments**; Electrochimica Acta (2015) 178, 525-532; <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2015.08.056>

/ Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **In-operando measurement of temperature gradients in cylindrical lithium-ion cells during high-current discharge**; ECS Electrochemistry Letters (2015) 4 (1) A1-A3; <http://dx.doi.org/10.1149/2.0031501eel>

/ Weinberger M (HIU), Pfeifer C., Diemant T. (HIU), Behm R. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Submicron-sized silicon oxycarbide spheres as anodes for alkali ion batteries**; Journal of Materials Chemistry A (2015) 3, 23707-23715; <http://dx.doi.org/10.1039/C5TA06277B>

/ Wessendorf C., Eigler R. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Eigler S. (ZMP), Hanisch J., Hirsch A. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Ahlswede E.; **Investigation of pentaarylaazafullerenes as acceptor systems for bulk-heterojunction organic solar cells**; Solar Energy Materials and Solar Cells 132 (2015) 450-454

/ Witte W., Abou-Ras D. (HZB), Albe K. (TU Darmst.), Bauer G.H. (Univ. Oldenb.), Bertram F. (Univ. Magdeb.), Boit C. (TU Berlin), Brüggemann R. (Univ. Oldenb.), Christen J. (Univ. Magdeb.), Dietrich J. (TU Berlin), Eicke A., Hariskos D., Maiberg M. (Univ. Halle), Mainz R. (HZB), Meessen M. (Univ. Oldenb.), Müller M. (TU Darmst.), Neumann O. (Univ. Oldenb.), Orgis T. (Univ. Halle), Paetel S., Pohl J. (TU Darmst.), Rodriguez-Alvarez H. (HZB), Scheer R. (Univ. Halle), Schock H.-W. (HZB), Unold T. (HZB), Weber A. (HZB), Powalla M.; **Gallium gradients in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2015, Vol. 23, 717-733; <http://dx.doi.org/10.1002/ppv.2485>

/ Zuberbühler U., Specht M., Brinner A., Baumgart F., Stürmer B., Feigl B.; **Power-to-Gas – Technischer Fortschritt und Perspektiven**; Solarzeitalter Ausgabe 3/2015, S. 43

/ Zuberbühler U., Specht M., Stürmer B., Brellocks J., Feigl B., Baumgart F., Brinner A., Marquard-Möllenstedt T., Steiert S., Schwarz S.; **Power-to-Gas: Errichtung und Betrieb einer Forschungsanlage zur Speicherung von erneuerbarem Strom als erneuerbares Methan im 250-kW<sub>el</sub>-Maßstab**; Projektbericht, September 2014

/ Binder J.; **Wege zur Plusenergiegemeinde und Lastmanagement am Beispiel Wüstenrot**; IV. Deutsch-Belarussisches Energieforum, Minsk, 25.11.2015

/ Bopp G. (FhG-ISE), Gabler H.; **Technical trends and innovations: Small PV systems for rural electrification**; Proc. of 4th Symposium „Small PV-Applications“, München, 9-10 June 2015, p. 13-20

/ Clark J.S., Haußmann J., Seidenberger K., Bergbreiter C., Wilhelm F., Scholta J., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Pournemat A. (HZB); **An investigation of the effects of the water distribution in real gas diffusion structures on fuel cell performance**; InterPore 7th International Conference on Porous Media & Annual Meeting, Padua, 18-21 May 2015

/ Clark J.S., Haußmann J., Seidenberger K., Bergbreiter C., Wilhelm F., Pournemat A., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **An investigation of the effects of the water distribution in real gas diffusion structures on fuel cell performance**; 5th European PEFC and H<sub>2</sub> Forum 2015, Lucerne, 30 June - 3 July 2015

/ Danzer M.; **Lithium-ion batteries for a sustainable mobility**; 7th Indo-German Frontiers of Engineering Symposium, Agra, February 2015

/ Döring H., Soczka-Guth T. (Daimler), Danzer M.; **Internal short circuit simulation – comparison of methods for testing cell stability in case of internal short circuit**; AABC Europe 2015, Mainz, 26-29 Jan. 2015

/ Hanisch J., Wahl T., Zellmer S. (TU Braunschweig), Garnweitner G. (TU Braunschweig), Ahlswede E.; **Metal oxide nanoparticles as charge carrier transport layers in highly stable doctor bladed inverted polymer solar cells**; International Conference Next-Generation Organic Photovoltaics II, Osterpoort, 28 June - 1 July 2015

/ Hariskos D., Jackson P., Powalla M.; **Cd-free Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-based solar cells with very high efficiencies  $\mu > 20\%$** ; 6th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology, Berlin, 29-30 April 2015

/ Haußmann J., Wilhelm F., Enz S., Klages M., Pournemat A., Bergbreiter C., Clark J.S., Duraisamy K., Seidenberger K., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **GDL and MPL characterization and their relevance to fuel cell modelling**; 228th ECS Meeting, Phoenix, 11-15 Oct. 2015, I05 – Polymer Electrolyte Fuel Cells 15 (PEFC 15)

/ Hempel W., Wischmann W.; **Influence of CIGS surface conditioning on GDOES depth profile measurement results**; ECASIA 2015, 16th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, Granada, 28 Sept. - 1 Oct. 2015

/ Herkel S. (FhG-ISE), Glembin J. (ISFH), Theis D. (IZES), Sperber E. (DLR), Binder J.; **Energiewende im Heizungskeller – Low-Ex-Systeme**; FVEE-Themen: Forschung für die Energiewende - Phasenübergänge aktiv gestalten, Tagungsband der FVEE-Jahrestagung 2014, S. 89-95, Berlin, April 2015

/ Jackson P., Hariskos D., Würz R., Kiowski O., Bauer A., Lotter E., Friedlmeier T., Hempel W., Powalla M.; **Properties of high efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells**; MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, 6-10 April 2015

/ Klee Barillas J., Waldenmaier D., Günther C., Danzer M.; **A generic and dynamic model of electrical energy storage systems for simulation of the interaction with the power grid**; 9. IRES: Energiespeicher für die Bereiche Strom, Wärme, Mobilität und Gas, Düsseldorf, 9.-11.3.2015

/ Lechner P., Hummel S., Schnepf J.; **Evaluation of recovery methods after potential induced degradation of PV modules**; Proc. of EU PVSEC 2015, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 14-18 Sept. 2015, p. 1813-1816

/ Lechner P., Hummel S., Schnepf J., Geyer D.; **Testmethode für realistische Simulation von PID**; Tagungsband 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4.-6.3.2015

/ Li J., Danzer M.; **Optimale Ladestrategie für PV-Batteriesysteme**; Tagungsband 30. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4.-6.3.2015

/ Li J., Popp H. (AIT), Istaq A. (Volvo), Danzer M.; **Cycle life test and resistance characterization of Li-ion cells with Si-based composite anode**; AABC Europe 2015, Mainz, 26-29 Jan. 2015

/ Matthis B.; **PV storage systems – sizing and operation to serve owner and grid**; World of Energy Solutions, Stuttgart, 12-14 Oct. 2015

/ Musiol F.; **Energiemix der Zukunft**; BfN-Zukunftsworkshop, Bonn, 15.4.2015

/ Pietruschka D. (HFT), Brennenstuhl M. (HFT), Matthis B., Binder J.; **Decentralised heat pumps and small electricity storages as active components in a virtual power plant for smart grid services**; Proc. of the 15th IEEE-EEEIC 2015 (International Conference on Environment and Electrical Engineering), Rome, 10-13 June 2015

/ Powalla M.; **Progress in high-efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> cells and modules on glass and flexible substrates**; EU PVSEC 2015, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 14-18 Sept. 2015

/ Schmidt M.; **Smart-Grid – Welche Rolle spielt die KWK?**; 5. Fachtagung Kraftwärme-Kopplung des AK Dezent und des UM Baden-Württemberg: Die Kraft-Wärme-Kopplung im zukünftigen Strommarkt, Stuttgart, 26.10.2015

/ Schmidt M.; **Flexibilitäts Optionen für eine sichere Energieversorgung – Perspektiven für Stadtwerke**; 2. Innovationskonferenz Energie erneuerbar gestalten, Grüner Strom Label e. V., Münster, 10.10.2015

/ Schmidt M.; **Flexibilitäts Optionen für eine sichere Energieversorgung – Perspektiven und Anforderungen an Stadtwerke**; 9. EUROSOLAR-Konferenz Stadtwerke mit Erneuerbaren Energien, Tübingen, 14.4.2015

/ Schmidt M.; **The political dimension: Germany's „Energiewende“ – a blueprint for other countries?**; Hitec Graduate School for Energy & Climate, Jülich, 27 April 2015

/ Schnabel T., Ahlswede E.; **Solution-based preparation of Cu<sub>2</sub>ZnGeS<sub>4</sub>Se<sub>4-x</sub> absorber layers**; 6th European Kesterite Workshop, Newcastle, 19-20 Nov. 2015

/ Seidenberger K., Wilhelm F., Scholta J.; **A kinetic Monte Carlo model to study the time-dependent evolution of water agglomerations in PEMFC GDLs**; 12th Symposium of Fuel Cell and Battery Modelling and Experimental Validation, Freiburg, 26-27 March 2015

/ Staiß F.; **Klimarelevante, politische Visionen und Vorgaben der letzten Dekade**; IHK Region Stuttgart, 10. Stuttgarter Klimagespräch – Zehn Jahre Klimapolitik auf dem Prüfstand, Stuttgart, 28.7.2015

/ Staiß F.; **Fortschrittsbilanz der Energiewende**; FfE-Fachtagung 2015 Merit Order für ein zukunftsfähiges Energiesystem, München, 29.-30.4.2015

/ Staiß F.; **Politik, Technik, Markt – Was treibt die Energiewende voran?**; Energie-Team Baden-Württemberg, Fellbach, 13.10.2015

/ Stellbogen D., Lechner P.; **Accelerated PV module aging by a two-axis solar tracking mirror concentrator system**; Proc. of EU PVSEC 2015, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 14-18 Sept. 2015, p. 1912-1916

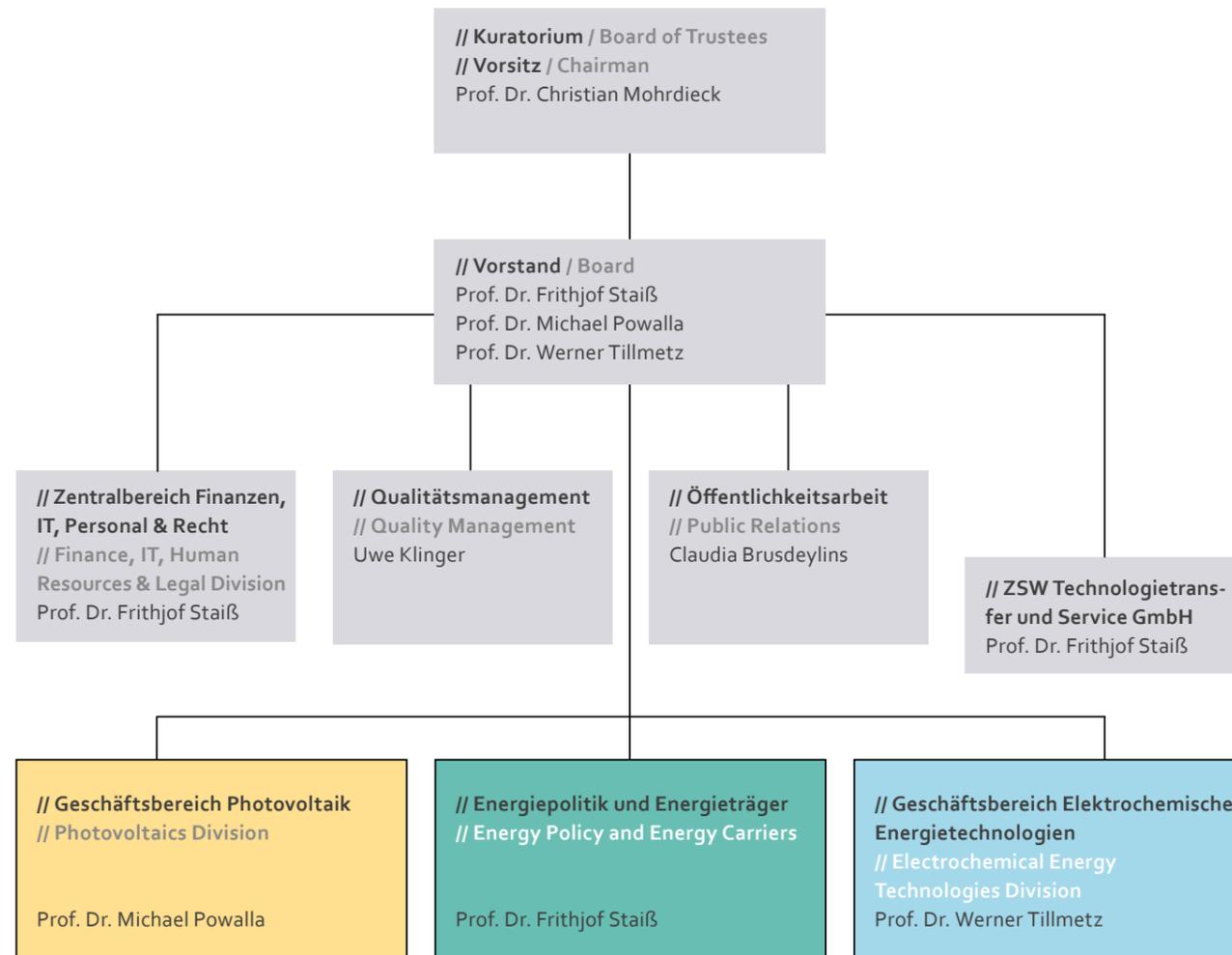
/ Witte W., Abou-Ras D. (HZB), Hariskos D.; **Improved growth behavior of buffer layers deposited from solution on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films**; E-MRS Spring Meeting, Lille, 11-15 May 2015

/ Zuberbühler U., Specht M., Brinner A., Baumgart F., Stürmer B., Feigl B.; **Power-to-Gas: Technical progress and perspectives**; 9. IRES: Energiespeicher für die Bereiche Strom, Wärme, Mobilität und Gas, Düsseldorf, 9.-11.3.2015

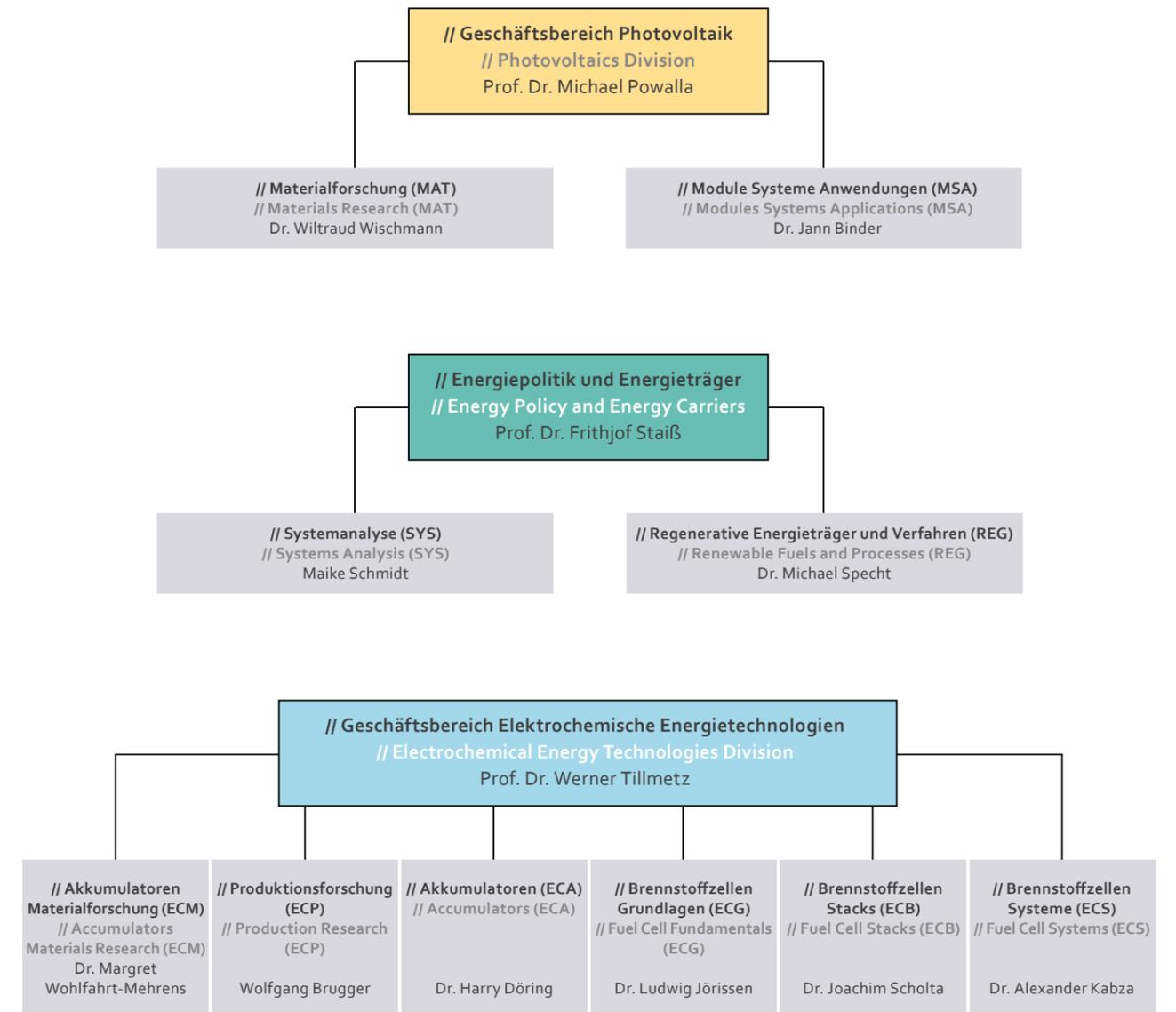
/ Zuberbühler U., Specht M., Brinner A., Baumgart F., Stürmer B., Feigl B.; **Fahrplanbetrieb PtG250**; BMWI-Statusseminar Energiespeicher, Berlin, 22.-23.4.2015

# // Organigramme Organisational Charts

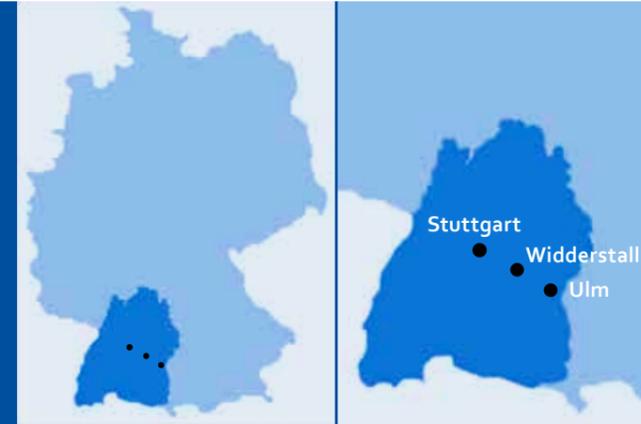
// Organigramm des Instituts  
// ZSW Organisational Chart



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



## // Standorte Locations



### // Stuttgart



Industriestraße 6  
70565 Stuttgart

### // Widderstall



Widderstall 14  
89188 Merklingen

### // Ulm



Helmholtzstraße 8  
89081 Ulm

### // Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24  
89081 Ulm

**Ansprechpartner / Contact**  
Claudia Brusdeylins  
Phone: +49 (0) 711 78 70-278  
E-mail: [claudia.brusdeylins@zsw-bw.de](mailto:claudia.brusdeylins@zsw-bw.de)

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

# // Abkürzungen Abbreviations

## // Firmen, Institute, Institutionen

### // Companies, Institutes, Institutions

<b>AABC</b>	Advanced Automotive Battery Conference
<b>AGEB</b>	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
<b>AGEE-Stat</b>	Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien – Statistik
<b>AiF</b>	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungseinrichtungen
<b>AIT</b>	Austrian Institute of Technology
<b>BAM</b>	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
<b>BDEW</b>	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
<b>BfN</b>	Bundesamt für Naturschutz
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung/ Federal Ministry of Education and Research
<b>BMUB</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit/Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety
<b>BMVI</b>	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur/ Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure
<b>BMWi</b>	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie/ Federal Ministry for Economic Affairs and Energy
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>ECS</b>	Electrochemical Society
<b>eLaB</b>	ZSW Labor für Batterietechnologie
<b>E-MRS</b>	European Materials Research Society
<b>EMPA</b>	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
<b>FFE</b>	Forschungsstelle für Energiewirtschaft
<b>FhG-ISE</b>	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
<b>FhG-IWES</b>	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
<b>FPL</b>	Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen/ Research platform for industrial production of lithium-ion cells
<b>FVEE</b>	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
<b>HFT</b>	Hochschule für Technik
<b>HIU</b>	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
<b>HZB</b>	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IHK</b>	Industrie- und Handelskammer
<b>IREs</b>	International Renewable Energy Storage (Conference)
<b>ISFH</b>	Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal
<b>IZES</b>	Institut für ZukunftsEnergieSysteme
<b>KEA</b>	Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg
<b>KEIT</b>	Korea Evaluation Institute of Industrial Technology
<b>MFW BW</b>	Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
<b>MRS</b>	Materials Research Society
<b>NPE</b>	Nationale Plattform Elektromobilität/German National Platform for Electric Mobility
<b>TNO</b>	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetens- chappelijk Onderzoek
<b>TU</b>	Technische Universität
<b>UM BW</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
<b>USTB</b>	University of Science and Technology Beijing
<b>VDMA</b>	Verband der Maschinen- und Anlagenbauer
<b>WI</b>	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
<b>WUT</b>	Warsaw University of Technology
<b>ZMP</b>	Zentralinstitut für Neue Materialien und Prozesstechnik

## // Technische Begriffe

### // Technical Terms

<b>AC</b>	Alternating Current/Wechselstrom
<b>AEL</b>	Alkaline Pressure Electrolysis/Alkalische Druckelektrolyse
<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle/Batterieelektrische Fahrzeuge
<b>BMS</b>	Battery Management System/Batteriemanagementsystem
<b>CBD</b>	Chemical Bath Deposition
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
<b>CHP</b>	Combined Heat and Power
<b>CIGS</b>	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
<b>CIS</b>	Kupfer-Indium-Diselenid
<b>DC</b>	Direct Current/Gleichstrom
<b>DH</b>	Damp Heat
<b>DUT</b>	Device under Test
<b>EE</b>	Erneuerbare Energien
<b>F&amp;E</b>	Forschung und Entwicklung
<b>FC-DLC</b>	Fuel Cell Dynamic Load Cycle
<b>FCEV</b>	Fuel Cell Electric Vehicle/Brennstoffzellenfahrzeug
<b>GDL</b>	Gas Diffusion Layer/Gasverteilerschicht
<b>GD-OES</b>	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy/ Optische Glimmentladungsspektroskopie
<b>HW</b>	Hardware
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnik
<b>IR</b>	Infrared/Infrarot
<b>LFP</b>	Lithium Iron Phosphate/Lithium-Eisen-Phosphat
<b>LNG</b>	Liquefied Natural Gas/Flüssigerdgas
<b>μ-CT</b>	Micro-Computed Tomography/Mikro-Computertomographie
<b>MPL</b>	Micro Porous Layer
<b>NCM</b>	Nickel Cobalt Manganese/Nickel-Kobalt-Mangan
<b>NMP</b>	N-Methyl-2-Pyrrolidone/N-Methyl-2-Pyrrolidon
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error/Mittlerer quadratischer Fehler
<b>P2G*</b>	Power to Gas
<b>P2H</b>	Power to Heat
<b>PDT</b>	Post Deposition Treatment
<b>PEFC</b>	Polymer Electrolyte Fuel Cell/ Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle
<b>PEM</b>	Polymer Electrolyte Membrane/Polymer-Elektrolyt-Membran
<b>PEMFC</b>	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell/ Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
<b>PHEV</b>	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
<b>PID</b>	Potential-Induced Degradation/Potenzialinduzierte Degradation
<b>PtL</b>	Power to Liquid
<b>PV</b>	Photovoltaics/Photovoltaik
<b>PVDF</b>	Polyvinylidenfluorid
<b>R&amp;D</b>	Research and Development
<b>R2R*</b>	Roll to Roll/Rolle zu Rolle
<b>REM</b>	Raster-Elektronen-Mikroskop
<b>RES</b>	Renewable Energy Sources
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscope
<b>SIL</b>	Safety Integrity Level/ Sicherheits-Integritätslevel
<b>SNG</b>	Substitute Natural Gas/Erdgassubstitut
<b>SOH</b>	State of Health
<b>TCO</b>	Transparent Conductive Oxides/Transparente leitfähige Oxide

## // Mitgliedschaften

// ZSW is a member of



<b>AKK</b>	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
<b>BBA-BW</b>	Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
<b>DGMK</b>	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
<b>DVG</b>	Deutsche Vakuumgesellschaft e. V.
<b>DWV</b>	Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband
<b>ECS</b>	Electrochemical Society
<b>EERA</b>	European Energy Research Alliance
<b>EFDS</b>	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.
<b>EUREC</b>	European Renewable Energy Centres Agency
<b>EWEA</b>	European Wind Energy Association
<b>GDCh</b>	Gesellschaft Deutscher Chemiker
<b>KLiB</b>	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien
<b>N.ERGHY</b>	New European Research Grouping (c/o DLR)
<b>Solar Cluster</b>	Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
<b>VDMA</b>	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
<b>WBZU</b>	Weiterbildungszentrum Ulm für Innovative Energietechnologien e. V.
<b>Windcluster BW</b>	Windcluster Baden-Württemberg
<b>WindForS</b>	Windenergie Forschungsnetzwerk Süd
<b>ZfES</b>	Zentrum für Energieforschung Stuttgart

## // Impressum

### // Imprint

## // Herausgeber Publisher

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

Industriestraße 6  
70565 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)

## // Redaktion Editors

Tiziana Bosa  
Claudia Brusdeylins  
Alexander Del Regno  
Gudrun Scherg  
Ulrike Zimmer

## // 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.

**Stuttgart:**

Industriestraße 6

70565 Stuttgart

Fon: +49 (0) 711 78 70-0

Fax: +49 (0) 711 78 70-100

[www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)**Solar-Testfeld Widderstall:**

Widderstall 14

89188 Merklingen

Fon: +49 (0) 7337 92 394-0

Fax: +49 (0) 7337 92 394-20

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

Helmholtzstraße 8

89081 Ulm

Fon: +49 (0) 731 95 30-0

Fax: +49 (0) 731 95 30-666

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

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