

// ERGEBNISSE
RESULTS



2012

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Stiftung / Foundation
5	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
6	Verabschiedung Prof. Hans Albrecht / Official Farewell to Professor Hans Albrecht
8	Erfolge 2012 / Achievements 2012
14	Schwerpunktbericht: Die Energiewende als Treiber für Innovationen Focus Report: The Energy Revolution as a Driver for Innovations
30	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
32	Systemanalyse / Systems Analysis
36	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
40	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
44	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
48	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
52	Ausblick eLaB 2014 / A view on eLaB 2014
54	Akkumulatoren / Accumulators
58	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
60	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
64	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
66	Mitarbeiter Verwaltung, Werkstätten und IT / Staff in Administration, Workshops and IT
68	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
76	25 Jahre ZSW / 25 Years ZSW
78	Dokumentation / Documentation
80	Haushaltsentwicklung / Budget Development
82	Personalentwicklung / Staff Development
84	Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
92	Organigramme / Organisational Charts
94	Standorte / Locations
96	Abkürzungen / Abbreviations
97	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

Die Energiewende in Deutschland hat auf Bundes- und Länderebene Fahrt aufgenommen. Die Ziele sind klar, der konzeptionelle Rahmen liegt vor und Bürgerinnen und Bürger bringen sich aktiv ein. Über den besten Weg wird kontrovers diskutiert. Das ist richtig und wichtig, denn die Transformation des Energiesystems ist komplex. Es geht dabei aber nicht nur um Risiken, sondern auch um die enormen Chancen für Innovation, Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

Mit seinen Technologien, die auf einem 25-jährigen Kompetenzaufbau beruhen, spielt das ZSW eine bedeutende Rolle in vielen Bereichen der Energiewende. Im Themenschwerpunkt des vorliegenden Jahresberichtes geht es um integrierte technische Systemlösungen, damit Anwendungen und Infrastrukturen für Strom, Wärme, Mobilität und Kommunikation optimal vernetzt werden. Anschließend werden wichtige Projekte und die Highlights des vergangenen Jahres vorgestellt: z. B. Lithium-Ionen-Zellen aus eigener Fertigung mit exzellenten Eigenschaften, optimierte Brennstoffzellen für die Antriebe der Zukunft, ein neuer Wirkungsgrad-Bestwert in der Dünnschicht-Photovoltaik und die Inbetriebnahme einer 250-kW-Power-to-Gas-Anlage. Auf dieser breiten technologischen Basis baut die Beratung für die Bundesregierung und das Land Baden-Württemberg zur Energiewende auf.

Wir freuen uns über das anhaltend hohe Interesse an unseren Arbeiten. Eine besondere Ehre war uns der Besuch der Staatspräsidentin Costa Ricas, Laura Chinchilla, in Begleitung des baden-württembergischen Ministers für internationale Angelegenheiten, Peter Friedrich, der Besuch des Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann mit dem Bundesumweltminister Peter Altmaier und dem Landesumweltminister Franz Untersteller sowie die Besuche der Bundesforschungsministerin Annette Schavan und des Finanz- und Wirtschaftsministers des Landes, Nils Schmid.

Der Dank des Vorstandes gilt zuerst allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die wie in den Jahren zuvor durch großen Einsatz zum Erfolg wesentlich beigetragen haben. Besonderer Dank gilt auch den Mitgliedern des Kuratoriums und dessen Vorsitzendem, Prof. Hans Albrecht, der sich für die Belange des Instituts bis zum Ablauf seiner Amtszeit im Mai 2012 unermüdlich eingesetzt hat. Wir freuen uns, dass Dr. Christian Mohrdieck die Weiterführung dieser wichtigen Aufgabe übernommen hat. Dem Land Baden-Württemberg danken wir für die finanzielle Förderung und hervorragende Zusammenarbeit ebenso wie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

The energy revolution in Germany has gathered pace at the national and regional level. The goals are clear, the conceptual framework is in place, and citizens are actively involved. The best way forward is also being hotly debated. This is right and important, since the transformation of the energy system is complex. However, the issue is not just about the risks but also about grasping the enormous opportunities available for innovation, business, the environment and society.

With its technologies based on expertise developed over 25 years, ZSW is playing an important role in many areas of the energy revolution. The main focus of this annual report is on integrated technical system solutions that will enable applications and infrastructures for electricity, heat, mobility and communications to be optimally linked. Important projects and the highlights from the previous year are presented here: for example self-produced lithium-ion cells with excellent properties, optimised fuel cells for future drive systems, a new efficiency record in thin-film photovoltaics and the start of operations of a 250-kW Power-to-Gas plant. This broad technological base provides the foundation for advising the German government and the Federal State of Baden-Württemberg on the energy revolution.

We are delighted about the sustained high level of interest in our work. The visit by the President of Costa Rica, Laura Chinchilla, who was accompanied by the Baden-Württemberg Minister for International Affairs, Peter Friedrich was a special honour for us as well as the visit by Minister President Winfried Kretschmann with Federal Environment Minister Peter Altmaier and Baden-Württemberg's Environment Minister Franz Untersteller and the visits by Federal Research Minister Annette Schavan and Baden-Württemberg's Minister for Finance and Economics, Nils Schmid.

The Executive Board would first of all like to thank all the staff whose dedication, as in previous years, has made a substantial contribution to ZSW's success. In particular, we would also like to thank the members of the Board of Trustees and its Chair, Professor Hans Albrecht, who worked tirelessly on behalf of the institute before retiring from office in May 2012. We are delighted that Dr Christian Mohrdieck has taken on this important task. 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.



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Prof. Dr. Michael Powalla



// Stiftung Foundation

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

Stiftungsauftrag:

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

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

The goal of the foundation is:

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

Stifter des ZSW / The founders are

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

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

Unternehmen / Commercial enterprises

- > Aare-Tessin AG für Elektrizität
- > Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Daimler AG
- > Dr. Hans-Jörg Mast
- > 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

- > Dr. Christian Mohrdieck

Stellvertreter / Vice Chairmen

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

Ministerien und Organisationen / Ministries and Organisations

- > Ministerialrätin Susanne Ahmed, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst, Baden-Württemberg
- > Regierungsdirektorin Kerstin Deller, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- > 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. Achim Bubenzer, 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. Johann Löhn, Präsident der Steinbeis-Hochschule Berlin
- > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Wirtschaft / Commercial enterprises

- > Mathias Berz, Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm
- > Dr. Winfried Hoffmann, European Photovoltaic Industry Association
- > Dr. Hubert Jäger, SGL Carbon GmbH
- > Prof. Dr.-Ing. Jürgen Lehold, Volkswagen AG
- > Dieter Manz, Manz AG
- > Dr. Christian Mohrdieck, Daimler AG
- > Dr. Matthias Müller, Robert Bosch GmbH
- > Dr. Wolfram Münch, Energie Baden-Württemberg AG
- > Dipl.-Ing. Roland Pröger, Fichtner GmbH & Co. KG
- > Dr. Günther von Au, Clariant Produkte GmbH
- > Dipl.-Ing. Gregor Waldstein, SolarFuel GmbH

// Verabschiedung von Prof. Hans Albrecht als Kuratoriumsvorsitzender

In einer Feierstunde verabschiedete das ZSW den scheidenden Kuratoriumsvorsitzenden und ehemaligen geschäftsführenden Vorstand, Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht.



// Gründungsvorstand Prof. Werner Bloss † 1996 (links) und Prof. Hans Albrecht; 1988.
// Founding ZSW Executive Board Member Professor Werner Bloss †1996 (left) and Professor Hans Albrecht 1988.



// Ministerialdirektor Ralf Schumacher überreicht Prof. Hans Albrecht die Wirtschaftsmedaille des Landes Baden-Württemberg.
// Director General Ralf Schumacher awards Professor Hans Albrecht the Enterprise Medal of the Federal State of Baden-Württemberg.

„Hans Albrecht gehört zu den Pionieren der erneuerbaren Energien nicht nur in Baden-Württemberg“, sagte Ministerialdirektor Ralf Schumacher vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg.

Sein gesamtes berufliches Leben hat Hans Albrecht dem Thema der erneuerbaren Energien gewidmet und sich bereits zu einer Zeit mit der Technologie auseinandergesetzt, als noch fast niemand die erneuerbaren Energien auf der Agenda hatte. Mit seiner Erfahrung aus der Industrie, aber auch aus der universitären Grundlagenforschung war Prof. Albrecht ein Glücksfall für das Institut. Die überaus erfolgreiche Entwicklung des ZSW bleibt untrennbar mit seinem Wirken verbunden.

Er begann seine berufliche Karriere nach dem Studium der Elektrotechnik an der Universität Stuttgart als Wissenschaftlicher Mitarbeiter. Bereits in den 70er Jahren widmete er sich der Solar-

forschung. Nach Promotion und Habilitation wechselte Albrecht 1977 in die Forschungsabteilung eines Automobilunternehmens. Die Verbindung zur Universität Stuttgart hielt er über eine seit 1980 ausgeübte außerplanmäßige Professur. Im Jahr 1992 übernahm er am ZSW die Position des ersten hauptamtlichen geschäftsführenden Vorstandsmitgliedes. Nach seinem Ausscheiden aus dem Vorstand 1999 blieb er dem ZSW als Vorsitzender des Kuratoriums verbunden.

Nach dem Bundesverdienstkreuz am Bande im Jahre 2000 wurde ihm anlässlich der Verabschiedung am 12. Oktober 2012 die Wirtschaftsmedaille des Landes Baden-Württemberg für seine Verdienste verliehen, Ergebnisse aus der Forschung in die Industrie und den Mittelstand zu transferieren.

Das ZSW dankt Prof. Albrecht sehr herzlich für sein unermüdliches Engagement zum Wohl des Instituts und wünscht ihm noch viele gesunde und glückliche Jahre.

// Official Farewell to Professor Hans Albrecht as the Chairman of the Board of Trustees

In an official ceremony, ZSW bid farewell to the retiring Chairman of the Board of Trustees and former Managing Director, Professor Hans Albrecht.



“Hans Albrecht is one of the pioneers of renewable energy, and not just in Baden-Württemberg,” said Ralf Schumacher, Director General from the Baden-Württemberg Ministry of Finance and Economic Affairs.

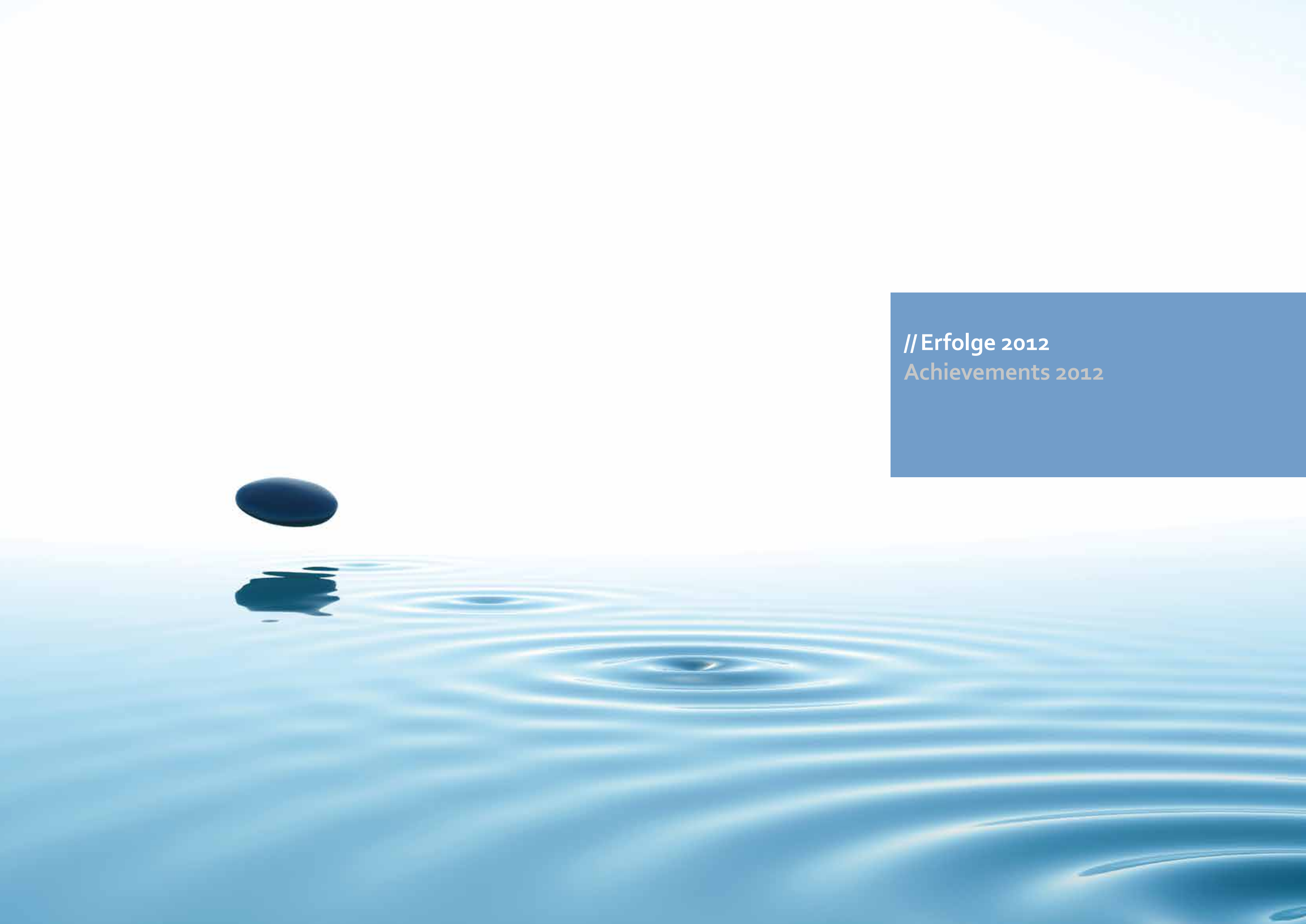
Hans Albrecht devoted his entire professional career to renewable energies and already began investigating the technology at a time when almost nobody had renewable energies on their agenda. With his experience not just from industry but also from university-based basic research, Professor Albrecht was a stroke of luck for the institute. ZSW’s successful development is inextricably linked to his work.

After studying electrical engineering at Stuttgart University, he began his professional career as a scientific assistant. He already began researching solar power back in the 1970s. After com-

pleting his doctorate and post-doctorate studies, Albrecht joined the research department of an automotive company in 1977. Since 1980, he has maintained his links to Stuttgart University by holding an extraordinary professorship. In 1992, he became the first full-time Managing Director at ZSW. After retiring from the Executive Board in 1999, he maintained his close ties to ZSW as the Chairman of its Board of Trustees.

After being conferred the Order of Merit on Ribbon of the Federal Republic of Germany in the year 2000, he was awarded the Enterprise Medal of the Federal State of Baden-Württemberg for his achievements in transferring research results to industry and SMEs.

ZSW cordially thanks Professor Albrecht for his tireless commitment to the welfare of the institute, and we wish him many more healthy and happy years.

A blue stone is shown floating just above a calm body of water. The stone is positioned on the left side of the frame. Below it, a series of concentric ripples spread out across the water's surface, creating a sense of movement and impact. The water is a deep blue color, and the background is a bright, hazy sky.

// Erfolge 2012
Achievements 2012

// Erfolge 2012 Achievements 2012

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung deutlich zu erhöhen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch die Entwicklung neuer und effizienterer Energietechnologien und ihren Transfer in den Markt. So wurden auch 2012 wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

Das Kapitel „Erfolge 2012“ präsentiert Ihnen die Highlights des Jahres in kompakter Form.

// Architektenentwurf für neues Institutsgebäude in Stuttgart ausgewählt

Das ZSW ist in den letzten Jahren gewachsen. Immer mehr Büro- und Laborflächen mussten in der Industriestraße in Stuttgart-Vaihingen hinzugemietet werden. Nach der Entscheidung 2011 für einen Neubau in der Nähe des Uni-Campus im Stuttgarter Engineering Park wurde im Herbst 2012 der Architektenentwurf für das neue Institutsgebäude vorgestellt. Das Gebäude wird auf 10.000 m² Fläche Forschungslabore, Werkstätten und Büros beherbergen. Der Entwurf des Architekturbüros Henning Larsen Architects aus Kopenhagen/München sieht einen mehrgeschossigen Neubau vor, der architektonische Kreativität, Solartechnik und Energieeffizienz verbindet. An der neuen Adresse erwartet das ZSW deutlich verbesserte Forschungsbedingungen. Der Baubeginn ist für 2014 anvisiert, der Umzug für Anfang 2016.

// Einweihung der 250-kW_{el}-Power-to-Gas (P2G®)-Anlage

Mit der Errichtung seiner 250-kW_{el}-P2G®-Anlage hat das ZSW im Herbst 2012 einen weiteren Meilenstein auf dem Weg zur Industrialisierung der Langzeitspeicher-Technologie gesetzt. Die Einweihung der Anlage in Stuttgart-Vaihingen am 30. Oktober fand eine enorme Resonanz sowohl in der Forschungslandschaft als auch in der Berichterstattung der Medien. Die vom Bundesumweltministerium geförderte Anlage soll wichtige Forschungsergebnisse erzielen, die auch dem e-gas-Projekt eines Automobilunternehmens zugutekommen werden. Der Automobilkonzern errichtet derzeit eine 6-MW-Anlage im Emsland, um Ökostromüberschüsse in erneuerbares Erdgas (e-gas) umzuwandeln. Unterdessen wird die im Jahr 2009 am ZSW konstruierte, containerintegrierte 25-kW-Anlage an einer Biogasanlage im hessischen Bad Hersfeld erprobt. Die P2G®-Technologie wurde maßgeblich am ZSW entwickelt, Partner sind das Fraunhofer-Institut IWES und ein privates Unternehmen, das auch die 6-MW-Anlage im Emsland baut.

“Energy with a future” describes the goal of considerably increasing the proportion of renewable energy sources used to supply energy. ZSW is pursuing this goal by developing new and more efficient energy technology and ensuring its transfer to the market, whereby excellent results were also achieved in 2012 in the core topic areas.

This section, Achievements 2012, presents the year’s highlights in compact form.

// Architectural scheme chosen for new institute building in Stuttgart

ZSW has grown in the last few years. Increasingly, more offices and laboratory space have had to be rented in the Industriestrasse in Stuttgart-Vaihingen. After the decision to build a new building near the university campus in Stuttgart’s Engineering Park in 2011, an architectural scheme for the new institute building was presented in autumn 2012. The building will house research laboratories, workshops and offices across a 10,000-m² floor area. The design by Henning Larsen Architects from Copenhagen/Munich envisages a new multi-storey building that combines architectural creativity, solar technology and energy efficiency. ZSW expects considerably improved research conditions at the new address. Construction is scheduled to begin in 2014, and the building should be ready to move into by 2016.

// Inauguration of the 250-kW_{el}-Power-to-Gas (P2G®) plant

In autumn 2012, ZSW set a further milestone on the way to industrialising long-term storage technology with the construction of its 250-kW_{el}-P2G® plant. The inauguration of the plant in Stuttgart-Vaihingen on 30 October has been excellently received both in the research community and the media. The plant, which was funded by the German Federal Ministry of the Environment, is designed to provide important research results that will also benefit the e-gas project of a German automobile manufacturer. The automotive company is currently constructing a 6-MW plant in Emsland in order to convert surplus green electricity into renewable substitute natural gas (e-gas). Meanwhile, the container-integrated 25-kW system constructed at ZSW in 2009 is being tested on a biogas plant in Bad Hersfeld in Hesse. The P2G® technology was largely developed at ZSW. The partners are the Fraunhofer IWES institute and a private company that is also constructing the 6-MW plant in Emsland.



// Entwurf der Frontalansicht und des Einblicks in den Innenhof des neuen Gebäudes in Stuttgart.
// Front elevation and view of the courtyard in the design for the new building in Stuttgart.

// eLaB im Vollbetrieb

Leistungsfähige Batterien sind für einen Leitmarkt Elektromobilität in Deutschland eine zentrale Voraussetzung. Mit dem ZSW-Labor für Batterietechnologie (eLaB) ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer wettbewerbsfähigen deutschen Batterie- und Zelltechnologie gelungen. Die Nachfrage seitens Materialherstellern, Komponentenlieferanten, Maschinen- und Anlagenbauern sowie Zellfertigern bis hin zu Batteriesystemherstellern ist groß. Im Test- und Sicherheitszentrum herrscht Vollbetrieb. Im Bereich Zellfertigung werden hervorragende Standardzellen im Format 18650 und kleine Pouchzellen hergestellt.

// Lithium-Ionen-Zellen made by ZSW

Die ZSW-Forscherguppe Akkumulatoren Materialforschung hat vor Kurzem ein knapp zweijähriges Forschungsprojekt abgeschlossen. Das Team hat als Technologie-Provider einen Herstellungsprozess für Elektroden und Zellen entwickelt und verschiedene Aktivmaterialgenerationen zu Vollzellen verarbeitet. Dabei ist es gelungen, mit 18650-Zellen, einem Batteriestandard, in puncto Lebensdauer und Energiedichte den aktuellen Stand der Technik zu übertreffen. Das galt für einzelne Zellen im Labormaßstab und für Kleinmuster-serien. Die komplette Entwicklung und Fertigung der Zellen konnte am Institut erfolgen. Im Sicherheits- und Batterietestzentrum des ZSW können Batterien mit Quetschtests, Kurzschlüssen, Hochvolt-, Vibrations- und Schocktests sowie Wärme- und Brandversuchen auf Sicherheit getestet werden. Die gefertigten Zellen präsentieren das ganzheitliche Wissen und Können des ZSW auf dem Gebiet der Lithium-Ionen-Technologie – von der Materialforschung über die Zellfertigung bis zu den Sicherheitstests.



// 40 m² Trockenraum mit Stapelmaschine für Pouchzellen.
// 40 m² drying room with a stacking machine for pouch cells.

// eLaB fully operational

Powerful batteries are essential in making Germany the leading electromobility provider. An important step towards achieving competitive German battery and cell technology has now been made with the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB). There is enormous demand, ranging from material manufacturers, component suppliers, machinery and system manufacturers to cell producers and battery system manufacturers. The test and safety centre is now fully operational, and standard 18650 cells and small pouch cells of an excellent quality are being produced in the cell production area.

// Lithium-ion cells made by ZSW

ZSW’s Accumulator Materials Research department has recently concluded a research project of nearly two years. As a technology provider, the team has developed a manufacturing process for electrodes and cells and has processed various generations of active materials to form full cells. Using cells in the standard 18650 battery format, they have managed to surpass the current state of technology in regard to service life and energy density. This applies to individual cells at a laboratory scale and to small batch series. The cells were developed and produced entirely at the institute. At the ZSW’s safety and battery test centre, the batteries’ safety was tested using crush, short-circuit, high-voltage, vibration and shock tests as well as with heat and fire tests. The cells produced depict the holistic knowledge and expertise of ZSW in the field of lithium-ion technology – ranging from material research and cell production to safety tests.



// Wickelzelle 18650: nach 7.500 Zyklen noch rund 90 % der Anfangskapazität.
// The 18650 coil cell still achieves about 90% of the initial capacity after 7,500 cycles.

// Erfolge 2012 Achievements 2012



// Neuer Bestwert bei einem CIGS-Dünnschichtmodul: 16,8 %
Die Effizienz ist eine wesentliche Stellschraube, wenn es um die Kostenreduzierung bei der Herstellung von Photovoltaikmodulen geht. Am ZSW ist eine Technikumslinie zur Herstellung von $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS)-Dünnschichtmodulen bis zu einer Fläche von $30 \times 30 \text{ cm}^2$ verfügbar. Dort werden in industrienahen Prozessen, bei denen die Substratgläser kontinuierlich durch die Vakuumanlagen transportiert werden (sog. Inline-Prozesse), alle für eine industrielle Umsetzung notwendigen Prozessschritte verbessert. So konnte im Jahr 2012 durch die konsequente Weiterentwicklung aller Einzelprozesse im Inline-Betrieb (z. B. CIGS-Deposition, Verschaltung und Frontkontakt) auf einer Fläche von $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ein neuer ZSW-Bestwert von $\eta = 16,8 \%$ erzielt werden.

// Monitoring von Tandem-Photovoltaikmodulen im Feld
Mit Hilfe von Tandem-Solarzellen lässt sich durch die Kombination unterschiedlicher Bandlückenmaterialien ein höherer Wirkungsgrad erreichen als mit entsprechenden Einfachzellen. Typische Vertreter im Feld sind die mikromorphen Silizium-Dünnschichtmodule mit einer $\text{a-Si}/\mu\text{c-Si}$ -Tandemzelle. Der Gesamtstrom und damit die Leistung des Tandemmoduls werden allerdings durch die schwächer beleuchtete der beiden Zellen limitiert. Am ZSW konnte erstmalig das im Freifeld aus natürlicher spektraler Variation resultierende Verhalten von Strom und Leistung eines Tandemmoduls mit Hilfe zweier Komponentenmodule charakterisiert werden. Diese repräsentieren mit ihrer spektralen Empfindlichkeit jeweils die Top- und Bottomzelle der Tandemzelle und erlauben die Messung der individuellen Ströme der Teilzellen. Die Arbeiten wurden auf dem neuen Freifeld-Teststand Girona in Spanien durchgeführt. Damit können Tandemzellen zukünftig besser spektral angepasst werden, um mit ihnen standortspezifisch einen maximalen Jahresenergieertrag zu erzielen.

// New best value for a CIGS thin-film module: 16.8%
Efficiency is an important parameter for reducing the production costs of photovoltaic modules. A technical lab line is available at ZSW for producing $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) thin-film modules up to a size of $30 \times 30 \text{ cm}^2$. Using industrial-scale processes in which the substrate glass is continually transported through the vacuum systems (so-called inline processes), all process stages required for industrial implementation are improved here. This systematic further development of all individual processes in inline operation (e.g. CIGS deposition, connections and front contact) enabled ZSW to achieve a new best value of $\eta = 16.8\%$ for a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ surface area in 2012.

// Monitoring of tandem photovoltaic modules in the field
Combining different bandgap materials in tandem solar cells enables greater efficiency to be achieved than with corresponding simple cells. Typical examples in this field are micromorphous silicon thin-film modules with an $\text{a-Si}/\mu\text{c-Si}$ tandem cell. However, the total current and thus the output produced by a tandem module are limited by the more weakly illuminated cell in the pair. Using two component modules, ZSW was able to characterise the current and output behaviour of a tandem module caused by the natural spectral variation outdoors for the first time. With their spectral sensitivity, these component modules represent the top and bottom cells in the tandem cell and enable individual currents to be measured in the part-cells. The work was conducted at the new outdoor testing facility in Girona, Spain. In future, this will enable tandem cells to be better matched in spectral terms so as to maximise their annual energy yield at specific sites.

// Fortschritte bei vakuumfrei hergestellten CIGS-Dünnschicht-Solarzellen

Neben der klassischen CIGS-Abscheidung werden am ZSW kostengünstige vakuumfreie Beschichtungsmethoden aus der Lösung geeigneter Ausgangsmaterialien entwickelt. Hierbei können z. B. sulfidische Nanopartikel verwendet werden, die nach der Auftragung in einem sequenziellen Heizprozess unter Selenatmosphäre zu einer $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ -Schicht umgewandelt werden. Mit diesem Materialsystem konnten bereits Solarzellenwirkungsgrade von über 10 % demonstriert werden. Das Bild unten links zeigt einen Demonstrator mit einem solchen Minimodul.

// 100-kW-Brennstoffzellen-Modultests nach DIN-Norm

Brennstoffzellen sind in einigen Märkten bereits kommerziell verfügbar oder stehen unmittelbar vor dem Markteintritt. Die Produkte müssen dafür vom Hersteller grundlegenden Prüfungen nach der DIN-Norm EN 62282-2 unterzogen werden. Dazu gehören Gasleck- und Kurzschlussprüfungen sowie Gefrier- und Auftauzyklen, um die notwendige Sicherheit im Dauerbetrieb zu gewährleisten. Seit Sommer 2012 können im Ulmer Testzentrum Brennstoffzellen bis 100 kW Leistung auch nach der Norm DIN EN 62282-2 geprüft werden. Das ist für diesen Leistungsbereich einzigartig in Deutschland. Die Messungen des ZSW wurden als Grundlage für eine industrielle Produktzertifizierung verwendet. Dies ergänzt die F&E-Themen Modellierung, Design und Realisierung von Brennstoffzellen. Das Brennstoffzellen-Testfeld besteht aus über 20 vollautomatisierten und flexibel adaptierbaren Testständen bis 120 kW_{el}. Neu ergänzt das Kompetenzspektrum eine Test- und Entwicklungsplattform für Fahrzeug-Brennstoffzellen.

// Progress with non-vacuum processed CIGS thin-film solar cells
In addition to standard CIGS deposition, ZSW is also developing cost-effective, non-vacuum coating methods from solutions of suitable base materials. For example, sulphidic nanoparticles can be used which, once they have been deposited in a sequential heating process in a selenium atmosphere, are transformed into a $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ layer. Solar cell efficiencies of more than 10% have already been demonstrated using this material system. The image on the bottom left shows a demonstrator with this type of mini-module.

// 100-kilowatt fuel cell module tests in accordance with DIN standard

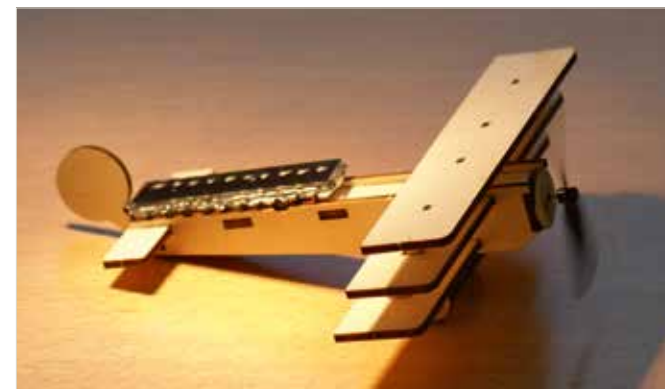
Fuel cells are already available in some markets or are about to be launched on the market. For this purpose, manufacturers must subject their products to thorough testing in accordance with the recognised EN 62282-2 DIN standard. These include gas leak and short-circuit tests as well as freezing and thawing cycles in order to ensure the necessary safety in 24/7 operation. Since the summer of 2012, the Fuel Cell Test Centre in Ulm has also begun testing fuel cells up to an output of 100 kilowatts in accordance with DIN EN 62282-2. This is unique for this output range in Germany. The measurements made by ZSW are used as the basis for certifying industrial production. This supplements the R&D core areas concerned with the modelling, design and realisation of fuel cells. The fuel cell test field consists of more than 20 fully automated and flexibly adaptable test rigs up to 120 kW_{el}. The range of expertise has been recently supplemented with a test and development platform for vehicle fuel cells.



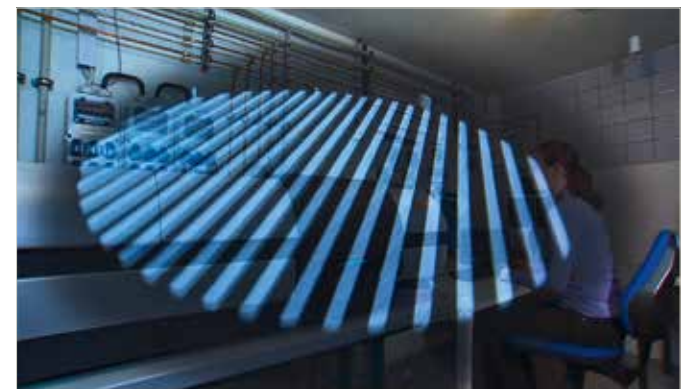
// CIGS-Modul mit 16,8 % Wirkungsgrad aus der Inline-Technikumslinie des ZSW.
// CIGS module with a 16.8% efficiency from the inline technical lab line at ZSW.



// Modulteststand des ZSW auf dem spanischen Testfeld Girona, das auch zum Monitoring von Tandemmodulen dient.
// ZSW's module testing facility at the Girona test field in Spain, which is also used for monitoring tandem modules.



// Demonstrator eines Minimoduls mit einer CIGS-Schicht basierend auf vakuumfrei aufgetragenen Nanopartikeln.
// Demonstrator for a mini-module with a non-vacuum deposited CIGS layer based on nanoparticles.



// Herstellung und Charakterisierung von Brennstoffzellen: Dichtungssanplikation (oben) und μ -CT.
// Manufacturing and characterisation of fuel cells: Sealing technology (above) and μ -CT.

A wide-angle photograph of a vast, deep blue ocean under a clear, light blue sky. Two white sailboats with single sails are visible in the lower-left quadrant, moving across the water. The horizon line is straight and divides the image roughly in half.

// Schwerpunktbericht Focus Report

Die Energiewende als Treiber für Innovationen
The Energy Revolution as a Driver for Innovations

// Schwerpunktbericht 2012 Focus Report 2012 Die Energiewende als Treiber für Innovationen The Energy Revolution as a Driver for Innovations



Energie wird in unterschiedlichen Formen, an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten benötigt, die nicht immer mit der lokalen Verfügbarkeit regenerativer Quellen korrelieren. Das gilt insbesondere für Wind und Sonne. Neben der effizienten Energiewandlung gehören daher auch die Verteilung und Speicherung von Energie zu den größten technischen Herausforderungen der Energiewende. Schon früh gab es den Ansatz, durch Sonnenlicht photovoltaisch Strom zu erzeugen und ihn mittels Wasserelektrolyse in Form von regenerativem Wasserstoff zu speichern. Dies war 1988 Namensgeber des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Seither hat sich unser Themenspektrum erweitert, die Speicherung erneuerbarer Energien ist jedoch nach wie vor ein zentrales Forschungsfeld.

Vom gesamten Endenergiebedarf in Deutschland entfallen auf die Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme rund 50 % und auf mechanische Energie rund 35 %. Die verbleibenden 15 % verteilen sich auf Beleuchtung, Kommunikation sowie Klimatisierung und Kälte (siehe Abb. 1). Bereitgestellt wird die Energie in Form von Strom, Wärme und Kraftstoff (siehe Tab. 1 und Abb. 2). Strom ist dabei die am vielseitigsten verwendbare Energieform und deckt gut 20 % des Endenergiebedarfs.

Energy is required in different forms, places and times that do not always correlate with the local availability of renewable sources. This particularly applies to the wind and sun. In addition to the efficient conversion of energy, the distribution and storage of energy are the greatest technical challenges of the energy revolution. The approach of photovoltaically generating electricity from sunlight and, by means of water electrolysis, storing it in the form of renewable hydrogen is not new. In 1988, this gave the name to the Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg, ZSW). Although we have now extended our range of interests, the storage of renewable energy is still one of our central research fields.

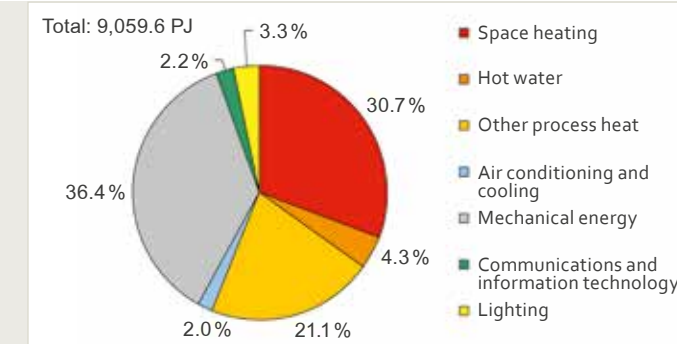
In terms of the total final energy demand in Germany, around 50% is used for providing space and process heating and around 35% is used for mechanical energy. The remaining 15% is used for lighting and communication as well as for air conditioning and cooling (Fig. 1). The energy is provided in the form of electricity, heat and fuel (Table 1 and Fig. 2), whereby electricity is the most versatile energy form and meets a good 20% of the energy demand.

// Energie als Treiber für Innovation

Die Energieversorgung ist sowohl Treiber für Innovation als auch selbst Gegenstand von Innovation. Für Deutschland mit seiner reichen Forschungslandschaft, seinem innovativen Mittelstand, dem technologisch führenden Maschinenbau und seiner international vernetzten Industrie bietet die Energiewende eine große Chance für Innovation, Umsatz und neue Arbeitsplätze. Denn die Transformation zu einem Energiesystem, in dem erneuerbare Energien im Zentrum stehen, erfordert eine ganze Reihe neuer Technologien, Anlagen und Komponenten. Diese müssen einerseits die Anpassung der Infrastruktur für die Energiebereitstellung, andererseits die Nutzung von alternativ bereitgestellter Energie in effizienter und an die Verfügbarkeit angepasster Weise ermöglichen.

// Energy as a driver for innovation

Energy provision is both a driver and the subject of innovation. With its rich research landscape, innovative SME sector, technologically leading mechanical engineering and internationally networked industry, the energy revolution offers Germany an enormous opportunity for innovation, revenue and new jobs. This because the transformation to an energy system focussed on renewable energies requires a whole series of new technologies, systems and components that, on the one hand, enable the infrastructure to be adapted for providing energy and, on the other, enable the use of alternatively produced energy in an efficient manner that is adapted to its availability.



// Abb. 1: Endenergiebedarf nach Anwendungsbereichen in Deutschland für das Jahr 2010.
// Fig. 1: Total delivered energy per field of application for Germany in 2010.

Quelle/Source: AGEB – Zusammenfassung Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren 2009–2010, <http://www.ag-energiebilanzen.de>

Anwendungsbereich Field of application	Energieform Form of energy		
Raumheizung und Warmwasser Space heating and hot water	Strom electricity	Brennstoff fuels	Wärme heat
Kommunikation, Beleuchtung, Klimatisierung Communications, lighting and air conditioning	Strom electricity		
Mobilität bzw. mechanische Energie Mobility and mechanical energy	Strom electricity	Kraftstoffe fuels	
Prozesswärme Process heat	Strom electricity	Brennstoff fuels	Wärme heat

// Tab. 1: Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe/Brennstoffe für die verschiedenen Anwendungszwecke. Nicht gezeigt sind Sonderformen, wie z. B. Klimatisierung durch solare Wärme und Beleuchtung durch Gaslampen.
// Tab. 1: Electricity, heat and fuels as forms of energy used for different fields of applications. Not shown are special forms, e.g. air conditioning using solar heat or lighting through gas lamps.

// Zukünftige Optionen für Energiebereitstellung und Energienutzung

Die Herausforderungen der Energiewandlung, -speicherung und -verteilung beinhalten viele Lösungswege und Varianten, die sich gegenseitig beeinflussen. Sie müssen mit Blick auf den Strom-, Wärme- und Kraftstoffsektor angegangen werden, um alle Nutzenergieformen am richtigen Ort und zur richtigen Zeit bereitstellen zu können.

Erneuerbare Energien werden fossile Energien zunehmend ablösen. Für maximale Effizienz ist die direkte Nutzung als Strom und Wärme anzustreben. Die kurzfristige Speicherung mit Pumpspeicherkraftwerken, Batterien oder thermischen Speichern ist möglich. Zur langfristigen Speicherung von Strom können Prozesse wie Power-to-Gas oder Power-to-Liquid genutzt werden, die z. B. Wasserstoff oder Methan als Erdgassubstitut erzeugen können. Für die Rückverstromung können Brennstoffzellen zu einem wichtigen Element werden, da sie sehr effizient und gut skalierbar sind und sowohl in stationären (Kraft-Wärme-Kopplung) als auch mobilen Anwendungen eingesetzt werden können.

Neben der Bereitstellung geeigneter Energiewandler ist die zeitliche und räumliche Abstimmung der Energieströme notwendig. Dabei ist es hilfreich, die Energieformen Strom, Wärme und Kraftstoffe eng zu vernetzen, um das Verschiebungspotenzial maximal nutzen zu können (Abb. 2).

// Aktuelle Beiträge und Forschungsthemen des ZSW zur Energiewende

Das ZSW trägt mit seiner angewandten Forschung dazu bei, die Herausforderungen der Energiewende zu bewältigen, indem es in der Beratung politischer Entscheidungsträger gangbare Lösungswege erarbeitet, geeignete Technologien erforscht und entwickelt und diese mit Partnern in kommerzielle Produkte transferiert. Dafür arbeitet das ZSW mit seinen 220 Naturwissenschaftlern, Ingenieuren und Ökonomen auf den Themengebieten Photovoltaik, regenerative Energieträger, Batterie- und Brennstoffzellentechnologien an technischen und ökonomischen Analysen von Energiesystemen sowie der Entwicklung von Zukunftsszenarien und dem Monitoring der Energiewende. Im Einzelnen werden hier vorgestellt:

// Future options for providing and using energy

In meeting the challenges of transforming, storing and distributing energy, many different possible solutions and alternatives are available that mutually impact one another. They need to be addressed with regard to the electricity, heating and fuel sectors in order to be able to provide all types of useful energy at the right place and time.

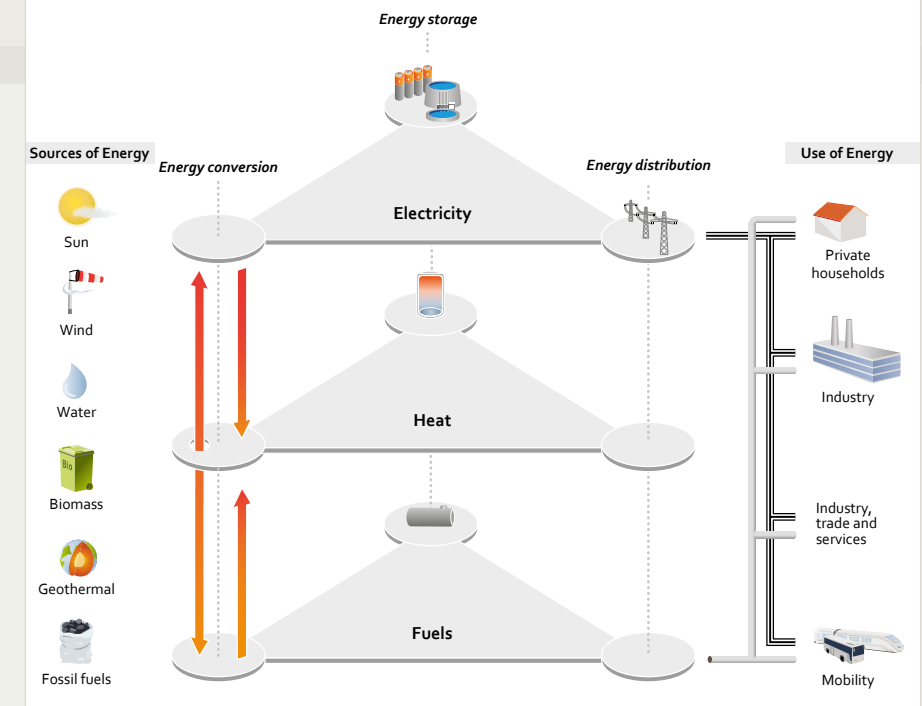
Renewable energies will increasingly replace fossil fuels. For maximum efficiency, the aim should be to use these directly as electricity and heat. They can be stored in the short term using pumped storage power plants and batteries, or by using thermal storage. For the long-term storage of electricity, it is possible to use, for example, Power-to-Gas or Power-to-Liquid processes that can generate hydrogen or methane as substitute natural gas. Fuel cells could become a very important factor in converting the gas back into electricity since they are highly efficient and easily scalable and can be deployed in both stationary (combined heat and power) and mobile applications.

In addition to providing suitable energy converters, the energy flows need to be coordinated in both temporal and spatial terms, whereby it is helpful to closely link the electricity, heat and fuel energy forms in order to maximise the displacement potential (Fig. 2).

// ZSW's current projects and research topics on the energy revolution

With its applied research and as part of its consultancy services for policy makers, ZSW is helping to meet the challenges of the energy revolution by establishing viable solutions, researching and developing suitable technologies and transferring these into commercial products together with partners. With its 220 scientists, engineers and economists working in the fields of photovoltaics, renewable energy sources and battery and fuel cell technologies, ZSW provides technical and economic analyses of energy systems, develops future scenarios and monitors the energy revolution. The following fields will be described in detail in what follows:

// Abb. 2: Von der Quelle zum Endverbraucher – Energiewandlung, Speicherung und Verteilung für die Energieformen Strom, Wärme und Brennstoffe/Kraftstoffe. Durch Kopplung entsteht Lastverschiebungspotenzial zur Anpassung an Erzeugungsschwankungen.
// Fig. 2: From the source to the end-user – energy conversion, storage and distribution shown for the energy sectors 'electricity', 'heat' and 'fuels'. Coupling of the sectors allows for demand side management to adapt to fluctuating generation.



- > Monitoring der Energiewende
- > Photovoltaik: Rolle im Energiemix
- > Elektrochemische Speicher für stationäre und mobile Anwendung
- > Regenerative Energieträger: vom Strom zum Brennstoff oder Kraftstoff
- > Brennstoffzelle: vom Brennstoff zu Strom und Wärme
- > Technologien für Verkehr und Mobilität

Daran wird deutlich, dass die Arbeiten vielfach vernetzt sind. Das ZSW trägt damit einer zentralen Herausforderung der Energiewende Rechnung: der Entwicklung von integrierten Systemen.

// Monitoring der Energiewende

Schon bevor die Bundesregierung mit ihrem Energiekonzept vom 28. September 2010 die Energiewende in Deutschland einleitete, wurde vom ZSW gemeinsam mit fünf weiteren Instituten aus dem Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) im Juni 2010 mit dem „Energiekonzept 2050“ ein Weg zur nachhaltigen Energieversorgung auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien aufgezeigt. Dieses Langfristszenario zeigt, dass es nicht nur möglich ist, Deutschlands Energieversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen, sondern dass dies langfristig deutlich kostengünstiger sein wird, als weiterhin auf ein Energiesystem auf Basis konventioneller Energieträger zu setzen. Damit ging das ZSW mit seinen Partnern deutlich über die im Energiekonzept der Bundesregierung formulierten Ziele hinaus. Doch auch für die von der Bundesregierung gesetzten Ziele, bis 2050 mindestens 60 % des Bruttoendenergieverbrauchs aus erneuerbaren Quellen zu decken sowie den regenerativ erzeugten Anteil am Stromverbrauch auf 80 % zu steigern, ist eine grundlegende Transformation des Energiesystems erforderlich. Das gilt nicht zuletzt, weil neben den Ausbauzielen für die erneuerbaren Energien

- > Monitoring the energy revolution
- > Photovoltaics: its role in the energy mix
- > Electrochemical storage systems for stationary and mobile applications
- > Renewable energy sources: from electricity to fuels
- > Fuel cells: from fuels to electricity and heat
- > Technologies for transport and mobility

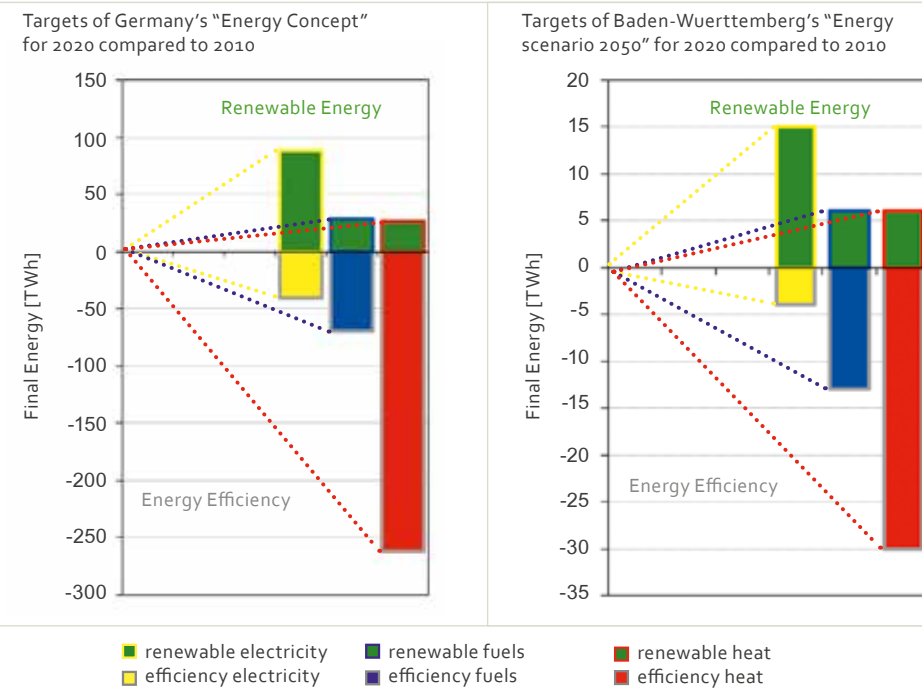
This goes to show the considerable extent to which the different areas of work are interlinked. ZSW is therefore taking into account a central challenge of the energy revolution: the development of integrated systems.

// Monitoring the energy revolution

In June 2010, even before the German government initiated the energy revolution in Germany with its Energy Concept of 28 September 2010, ZSW and five other institutes from the Renewable Energy Research Association (FVEE) outlined a path for providing a sustainable energy based on energy efficiency and 100% renewable energies with its “Energy Concept 2050”. This long-term scenario shows that it is not only possible to completely convert Germany’s energy provision to renewable energy but that this will be considerably cheaper in the long term than continuing to rely on an energy system based on conventional fuels. ZSW and its partners therefore went considerably further than the aims formulated in the German government’s Energy Concept. Nevertheless, the German government’s aims of meeting at least 60% of the gross final energy consumption from renewable sources by 2050 and increasing the renewable portion of the electricity consumption to 80% also require a fundamental transformation of the energy system. This is not least because, in addition to the development targets for renewable energies, ambitious energy efficiency targets have also been set in order to reduce greenhouse gas emissions by 40%

// Abb. 3: Vergleich der Leitstudie für Deutschland mit dem Energiekonzept für Baden-Württemberg.

// Fig. 3: Comparison of the Energy Concept study for Germany with the Energy Scenario for Baden-Württemberg



anspruchsvolle Energieeffizienzziele gesetzt wurden, um bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 % und bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 zu mindern. Hiermit erfüllt Deutschland seinen Beitrag zur weltweiten Begrenzung des Treibhausgasausstoßes. Durch den nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima im Sommer 2011 beschlossenen beschleunigten Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie wird die Erfüllung der unverändert angestrebten Klimaschutzziele noch anspruchsvoller.

Die Bundesregierung hat zur Begleitung und Bewertung des Fortschritts der Energiewende in Deutschland eine vierköpfige Expertenkommission eingesetzt, die jährlich eine Stellungnahme zum Monitoringbericht der Bundesregierung erarbeitet. Der geschäftsführende Vorstand des ZSW, Prof. Dr. Frithjof Staiß, wurde von der Bundesregierung in diese Expertenkommission berufen. Entsprechend intensiv begleitet das ZSW die Energiewende. Seine langjährige Erfahrung fließt hier ebenso ein wie die Arbeit des Fachgebiets Systemanalyse und die hervorragende Datenbasis zu erneuerbaren Energien, die durch die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) aufgebaut werden konnte, die für die Bundesregierung tätig ist und vom ZSW geleitet wird.

Umgesetzt wird die Transformation des Energiesystems jedoch nicht allein auf Bundesebene. In den Bundesländern, den Regionen sowie auf kommunaler Ebene finden zahlreiche Aktivitäten statt. Gerade die Bundesregierung beklagt immer wieder die mangelnde Abstimmung zwischen den einzelnen Ebenen. Da das ZSW auf sämtlichen Ebenen beratend tätig ist, bezieht es stets auch die übergeordneten Rahmenbedingungen mit ein. So ist beispielsweise das als Grundlage für das Integrierte Energie- und Klimakonzept der Landesregierung Baden-Württemberg erarbeitete Energieszenario Baden-Württemberg 2050 sowohl kompatibel zu den Bundeszielen als auch zu den Zielsetzungen auf europäischer Ebene, bezieht aber gleichzeitig regionale Randbedingungen mit ein (Abb. 3). Die in regelmäßigen Abständen gemeinsam mit dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung erarbeitete Bundes-

by 2020 and by 80-95% by 2050 relative to 1990. In this regard, Germany is meeting its contribution to limiting the worldwide emissions of greenhouse gases. However, the accelerated phasing out of nuclear energy following the reactor disaster in Fukushima in summer 2011 is making it even more challenging to meet the climate protection goals that are still being targeted.

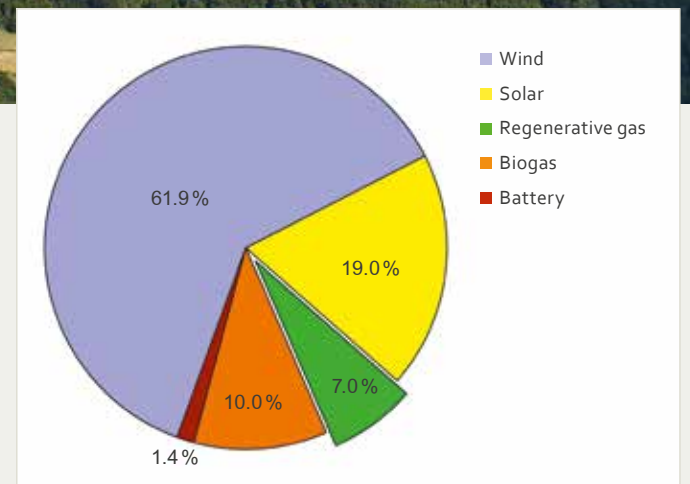
In order to monitor and assess the progress of the energy revolution in Germany, the German government has established a four-person commission of experts that each year delivers a statement on the German government's monitoring report. The Managing Director of ZSW, Professor Frithjof Staiß, has been appointed to this commission of experts by the German government. ZSW is therefore monitoring the energy revolution very closely. Not only is his many years of experience put to use here but also the work of the Systems Analysis research department and the excellent database on renewable energies developed by the Working Group on Renewable Energy – Statistics (AGEE-Stat), which works for the German government and is managed by ZSW.

However, the energy system is not just being transformed at the national government level. Numerous activities are also being undertaken in the federal states, regions and at the local community level. In this context, the German government constantly complains about the lack of coordination between the individual levels. Because, however, ZSW provides consultancy services at all levels, it always factors in the overarching framework conditions. For example, the Energy Scenario Baden-Wuerttemberg 2050, which has been developed to provide the basis for the Baden-Wuerttemberg government's integrated energy and climate concept, is compatible with both national goals and the targets at the European level, but, at the same time, takes into account regional circumstances (Fig. 3). The federal states comparison study that ZSW draws up at regular intervals with the German Institute for Economic Research (DIW) also provides ZSW with an insight into the progress made in other federal states with regard to the energy revolution.

// Focus



// Abb. 4: Optimaler Erzeugungsmix am Beispiel der ländlichen und windreichen Region Heubach (10.000 Einwohner), berechnet mit dem vom ZSW entwickelten Optimierungstool P²IONEER.
// Fig. 4: Optimal generation mix based on the rural and wind-abundant region of Heubach (10,000 inhabitants), calculated using the P²IONEER optimisation tool developed by ZSW.



ländervergleichsstudie erlaubt dem ZSW auch Einblicke in den Fortschritt der Energiewende in anderen Bundesländern.

Um die Energiewende nicht nur technisch, sondern auch ökonomisch effizient umzusetzen, bearbeitet das ZSW eine Reihe von Fragestellungen. Konzeptionelle Überlegungen lassen sich dabei anhand von Systemsimulationen unterlegen. So können mit dem Strommarktmodell REMO für Deutschland, das auch die Verknüpfungen der Märkte innerhalb Europas berücksichtigt, Schlüsse auf die zukünftige Entwicklung des Börsenstrompreises oder der zu erwartenden Stromüberschüsse aus erneuerbaren Energien gezogen werden, um daraus Empfehlungen für die Politik zur zukünftigen Gestaltung der Energiewende abzuleiten. Eine auf Baden-Württemberg zugeschnittene Weiterentwicklung des Modells ist aktuell in Bearbeitung. Sie soll die Landesregierung bei der Beurteilung der Versorgungssicherheit in Baden-Württemberg nach Wegfall der Kernenergie und gleichzeitig ambitioniertem Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien unterstützen.

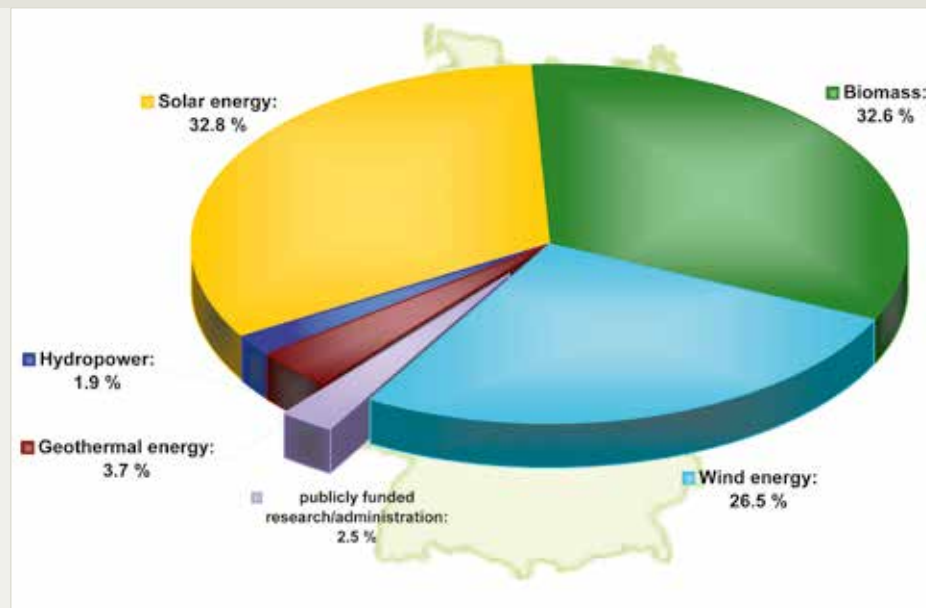
Auch für Kommunen, die die Energiewende mitgestalten wollen, bietet das ZSW mit dem Optimierungsmodell P²IONEER (Abb. 4) die Möglichkeit, eine bis zu 100 % auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung mit dem an den jeweils örtlich gegebenen Potenzialen orientierten kostenoptimalen Energiemix abzubilden. Das soll den Fortschritt der Energiewende auch auf kommunaler Ebene unterstützen.

In order to enable an efficient implementation of the energy revolution not only in technical but also in economic terms, ZSW is focussing on a whole series of aspects, whereby conceptual considerations can be substantiated using system simulations. For example, the REMO electricity market model for Germany, which also takes into account the market links within Europe, enables conclusions to be drawn on the future development of the traded price of electricity or the expected surplus electricity from renewable energies in order to derive recommendations for the government on the future organisation of the energy revolution. A further development of the model tailor-made for Baden-Württemberg is currently in progress and is intended to help the state government assess the supply security in Baden-Württemberg with the phasing out of nuclear power and the simultaneous ambitious expansion of fluctuating renewable energies.

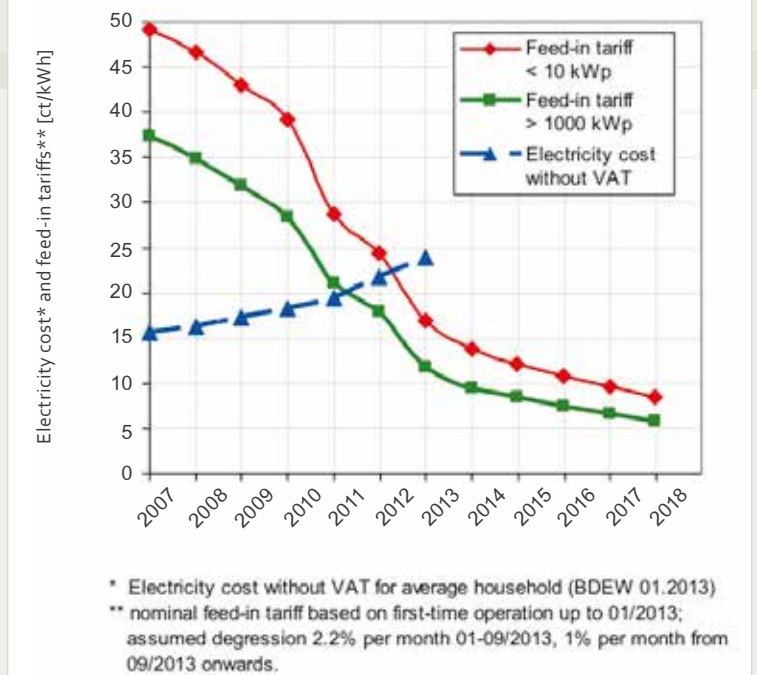
With its P²IONEER optimisation model (Fig. 4), ZSW also enables local communities that want to help shape the energy revolution to project energy provision based on up to 100% renewable energy that comprises a cost-optimised mixture of renewable energies oriented to their specific potential on location. This should help to advance the energy revolution at the local community level.

// Abb. 5: Anteilmäßige Verteilung der rund 381.600 Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien im Jahr 2011.
// Fig. 5: Proportional distribution of the roughly 381,600 jobs in the renewable energy sector in 2011.

Quelle/Source:
Zwischenbericht „Kurz- und langfristige Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt“, Stand März 2012
www.erneuerbare-energien.de



// Abb. 6: Einspeisevergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) als Indikator für die Kostenentwicklung von Solarstrom (Stand 1.1.2013).
// Fig. 6: Feed-in tariff according to the EEG Act as an indicator for the cost development of solar power (as of 1 January 2013).



Photovoltaik: Rolle im Energiemix

Die Photovoltaik (PV) leistet einen wichtigen Beitrag zur Energiewende. Mit mehr als 1,2 Mio. PV-Anlagen auf Privathäusern und landwirtschaftlichen Gebäuden haben ebenso viele Bürger die Rolle gewechselt und sind vom reinen Stromkonsumenten zum zeitweisen Stromproduzenten geworden. Im Jahr 2012 wurden 4,6 % der Bruttostromerzeugung in Deutschland mit Strom aus Photovoltaik bewerkstelligt – eine Steigerung gegenüber dem Vorjahr um 44 %. Rund ein Drittel der knapp 400.000 Arbeitsplätze im Bereich erneuerbarer Energien entfallen auf die Photovoltaik (Abb. 5).

Wissenschaft und Industrie haben mit großen technologischen Fortschritten und stark ausgeweiteten Produktionskapazitäten zu massiven Reduktionen der PV-Systemkosten beigetragen: allein über die letzten drei Jahre von 2010 bis 2012 um den Faktor zwei.¹ Von einer anfänglich noch teuren Art, Strom zu erzeugen, ist die Photovoltaik damit zu einer der großen nachhaltigen Stromerzeugungsformen geworden, die nach der traditionellen Wasserkraft und der Windkraft an Land heute bezüglich der Kosteneffizienz an dritter Stelle liegt. Die Kosten für PV-Strom lagen zum Anfang des Jahres 2013 bei 17 ct/kWh für Aufdachanlagen und gut 11 ct/kWh für große Freiflächenanlagen (Abb. 6) und damit auch ohne Mehrwertsteuer deutlich unter den Strombezugskosten für den Durchschnittshaushalt in Deutschland.

Einerseits unterstützt das ZSW mit seinen Arbeiten zu Dünnschicht-Solarzellen auf Glas und flexiblen Materialien sowie auf dem Gebiet gedruckter, vakuumfrei herstellbarer Solarzellen die weitere Optimierung und Kostensenkung bekannter Modultechnologien. Auch die Entwicklung von Fertigungsverfahren für die Solarzellen der nächsten Generationen zielen auf Kosten für den PV-Strom von weit unter 10 ct/kWh. Flankierend können mit den umfangreichen Messeinrichtungen im PV-Testlabor Solab die ge-

// Photovoltaics: its role in the energy mix

Photovoltaics (PV) is making an important contribution to the energy revolution. With more than 1.2 million PV installations on private houses and agricultural buildings, just as many citizens have swapped roles and have changed from being pure electricity consumers to part-time electricity producers. In 2012, 4.6% of the gross electricity generation in Germany was provided by electricity from photovoltaics – which represents a 44% increase on the previous year. Around a third of the almost 400,000 jobs in the renewable energy sector are related to photovoltaics (Fig. 5).

With considerable technological progress and significant expansion in production capacities, scientists and industry have helped contribute to a massive reduction in PV system costs: in the last three years alone, from 2010 to 2012, these have sunk by a factor of two.¹ From being initially an expensive way to generate electricity, photovoltaics has therefore become one of the major forms of sustainable electricity generation that, after hydropower and onshore wind energy, is now ranked third when it comes to cost efficiency. At the beginning of 2013, the costs for PV electricity were around 17 ct/kWh for rooftop systems and just over 11 ct/kWh for large-scale ground-mounted installations (Fig. 6) and therefore, even without the value added tax, considerably less than the electricity procurement costs for an average household in Germany.

With its work on thin-film solar cells on glass and flexible materials and on printed solar cells produced without a vacuum, ZSW is on the one hand supporting further optimisation and reduction in costs of established module technologies. The development of production processes for next-generation solar cells is also aimed at achieving costs for PV electricity that are far below 10 ct/kWh. On behalf of customers, the comprehensive measurement equipment in the Solab module test laboratory also enables the currently

genwärtig verfügbaren Solarmodule im Kundenauftrag in Bezug auf Qualität, Langlebigkeit und Ertrag im Labor und Freifeld charakterisiert werden.

Andererseits widmet sich das ZSW der Rentabilität des PV-Stroms jenseits der Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und seiner Netzverträglichkeit. Eigenverbrauch von Solarstrom am Ort der Erzeugung ist schon heute wirtschaftlich interessant für den Anlagenbesitzer. Weiter erlebbar wird die Energiewende, wenn das Eigenheim neben der PV-Anlage einen zusätzlichen Batteriespeicher erhält und damit die Eigenversorgung mit Strom auf über 50 % des Jahresgesamtbedarfs erhöht werden kann. Diese Werte ergeben sich nicht nur in Simulationen zur geeigneten Auslegung der Systeme, sondern auch im Feldversuch mit Lithium-Ionen-Batteriesystemen bei Feldtestkunden im Rahmen des Sol-ion-Projekts.² Der Einsatz einer Wärmepumpe kann die Rentabilität der PV-Anlage weiter erhöhen. Schließlich wird gegenwärtig untersucht, inwieweit sich dezentrale Batteriesysteme zur Stützung bzw. Entlastung des Stromnetzes in Zeiten einer hohen Verfügbarkeit von PV-Strom eignen. Batteriesysteme mit intelligenten Ladestrategien ermöglichen dabei eine signifikante Steigerung der Aufnahmefähigkeit des Verteilnetzes für PV-Strom.

// Elektrochemische Speicher für stationäre und mobile Anwendungen

Neben dem Bedarf für stationäre Speicher für die oben genannte Optimierung der Wertschöpfung dezentraler PV-Anlagen jenseits des EEGs wird langfristig, bei dann sehr hohem Anteil an erneuerbaren Energien, ein Bedarf für stationäre Speicher zur Netzdienstleistung entstehen. Dabei müssen Kurzfristspeicher den Wegfall von konventionellen Generatoren und deren rotierenden Massen kompensieren. Das ZSW beteiligt sich mit seiner umfangreichen

available solar modules to be characterised in terms of quality, durability and yield in the laboratory and outdoors.

On the other hand, ZSW is also focussing on the profitability of PV electricity beyond the remuneration provided by the German Renewable Energy Sources Act (EEG) and its grid compatibility. The self-consumption of solar power at the place where it is generated is already economically interesting for system owners. The energy revolution will become even more tangible when private houses receive an additional battery storage system in addition to their PV systems and can thus increase their self-provision of electricity to more than 50% of their total annual requirement. Such values have been produced not just in simulations of suitable system designs but also in field tests with lithium-ion battery systems on behalf of customers as part of the Sol-ion project.² The use of heat pumps can also further increase the profitability of PV systems. Finally, the extent to which decentralised battery systems are suitable for supporting or relieving the electricity grid at times when there is a high availability of PV electricity is also being investigated at the moment, whereby battery systems with intelligent charging strategies enable a significant increase in the ability of the distribution network to accept PV electricity.

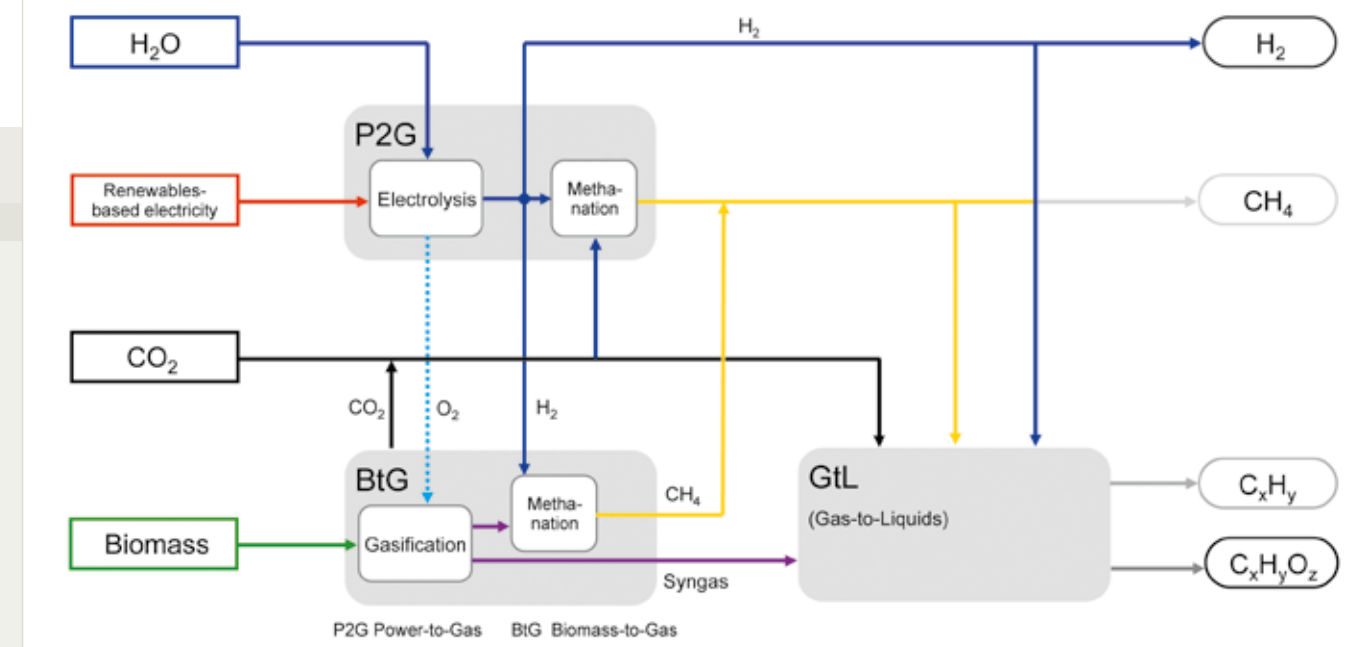
// Electrochemical storage systems for stationary and mobile applications

In addition to the aforementioned need for stationary storage systems for optimising the added value of decentralised PV systems beyond the EEG Act, there will be a need for stationary storage systems for providing grid services in the long term when there will be a very high proportion of renewable energies. Here short-term storage systems will need to compensate for the loss of conventional generators and their rotating masses. With its compre-

¹ http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/Grafiken/pdf/BSW_Preisindex_1204.pdf

² Verweise auf die entsprechenden Veröffentlichungen und Projektpartner finden sich in der Literaturliste ab Seite 84.

² References to the corresponding publications and project partners can be found in the bibliography on page 84.



// Abb. 7: Prozessketten zur Erzeugung von gasförmigen und flüssigen regenerativen Brennstoffen aus Wasser, CO_2 und Biomasse unter Energieeintrag durch Strom; die gezeigten Prozesse sind Power-to-Gas (P2G®), Biomass-to-Gas (BtG) und Gas-to-Liquid (GtL).

// Fig. 7: Process chains for generating gaseous and liquid renewable fuels from water, CO_2 and biomass with the energy input as electricity; the processes shown are Power-to-Gas (P2G®), Biomass-to-Gas (BtG) and Gas-to-Liquid (GtL).

Kompetenz in der Batteriecharakterisierung und Modellierung an entsprechenden Forschungsvorhaben.

Angeschoben wurde die Entwicklung großformatiger Zellen, die auch für stationäre Anwendungen geeignet sind, jedoch durch den aktuellen Bedarf an elektrischen Speichern für die Elektromobilität. Lithium-Ionen-Batterien werden als diejenige Technologie betrachtet, die das Potenzial hat, die hohen Anforderungen an Energiedichte, Zyklenfestigkeit und Wirkungsgrad zu erfüllen. Die Forschungsaktivitäten am Institut fokussieren sich im Bereich der Technologieentwicklung zum einen auf Produktionsprozesse, um die Qualität der Zellen zu erhöhen und Kosten zu reduzieren, und zum anderen auf die Charakterisierung und Synthesisierung neuer Materialien. Zur Steigerung der Energiedichte werden Materialien wie Hochvoltspinelle untersucht, die zu einer höheren Zellspannung und einer höheren spezifischen Kapazität der Batterien führen. Andere Projekte widmen sich der verbesserten Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien, bei denen neuartige Elektrolyte und alternative Anodenmaterialien wie Titanat eingesetzt werden.

Für den Einsatz als elektrochemische Speicher in der Elektromobilität werden Lithium-Ionen-Batterien in unterschiedliche Richtungen optimiert. Für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) werden Batterien entwickelt, die einen hohen Energiegehalt haben, womit sich die Reichweite steigern lässt. Bei Hybridfahrzeugen (HEV), die weiterhin über einen konventionellen Verbrennungsmotor verfügen, wird die Batterie im Wesentlichen zur Bremsenergieerückgewinnung und für die Unterstützung von Beschleunigungsvorgängen eingesetzt. In diesen Anwendungsfällen steht weniger die Energie- als die Leistungsdichte im Vordergrund. Die Vorteile elektrochemischer Speichersysteme sind u. a. die geringe Selbstentladung, der hohe Wirkungsgrad, die Unabhängigkeit von Geographie und Geologie sowie ihr modulares Design mit adaptierbarer Speichergröße. Mit dem Labor für Batterietechnologie eLaB ist am ZSW 2011 ein modernes Batterieforschungszentrum entstanden, an dem insbesondere der Technologietransfer in die In-

hensive expertise on characterising and modelling batteries, ZSW is taking part in appropriate research projects.

The development of large-scale cells that are also suitable for stationary applications has been driven forward by the current need for electrical storage systems for electromobility. Lithium-ion batteries are considered to be the technology that has the potential to meet the considerable demands regarding energy density, cycle stability and efficiency. In the technology development field, the institute's research activities are focussed, on the one hand, on production processes to increase the cell quality and reduce costs and, on the other hand, on characterising and synthesising new materials. To increase the energy density, materials such as high-voltage spinels that increase the cell voltage and specific capacity of the batteries are being investigated. Other projects focus on improving the safety of lithium-ion batteries, whereby new kinds of electrolytes and alternative anode materials are being deployed such as titanates.

Lithium-ion batteries are being optimised in different ways for use as electrochemical storage systems for electromobility purposes. Batteries with a high energy content that extend the operating range of battery-powered vehicles (BEV) are being developed. With hybrid vehicles (HEV) that continue to use conventional combustion engines, the batteries are mainly used for recycling brake energy and for supporting the acceleration processes. With these applications, the focus is not so much on the energy density but on the power density. The advantages of electrochemical storage systems include their low self-discharge rate, high efficiency, independence from geographic and geologic conditions as well as their modular design with adaptable storage sizes. With the opening of the eLaB laboratory for battery technology in 2011, a modern battery research centre has been established at ZSW that particularly drives forward the transfer of technology into industry. The work there focusses on cell production, testing batteries of different sizes and performances classes, destructive safety tests and post-

dustrie vorangetrieben wird. Schwerpunkte der Arbeit liegen dort auf der Zellfertigung, dem Batterietest auf unterschiedlichen Größen und Leistungsklassen, dem zerstörerischen Sicherheitstest, der Post-mortem-Analyse sowie der elektrischen und thermischen Batteriesystemtechnik.

// Regenerative Energieträger: vom Strom zum Brennstoff oder Kraftstoff

Die bisherige Stromversorgung folgt im Wesentlichen nur der „Einbahnstraße“ vom Energiesegment „Brennstoff“ zum Energiesegment „Strom“ über fossil betriebene Kraftwerke und Blockheizkraftwerke (Abb. 2). Auf diesem Weg der Stromerzeugung entsteht CO_2 . Ein wesentlicher Anteil der Arbeiten am ZSW besteht in der Entwicklung von Verfahren und Anlagen, die den umgekehrten Weg eröffnen, also wieder Brenn- oder Kraftstoffe mit Hilfe von Energie aus dem Stromsektor erzeugen. Auf dem Weg vom Segment „Strom“ zum Segment „Kraftstoff“ wird ggf. CO_2 aus vorhandenen Quellen gebunden, das bei der Nutzung des Kraftstoffes wieder freigesetzt wird. Der Prozess ist somit CO_2 -neutral. Der Schwerpunkt der Arbeiten am ZSW liegt auf einem regenerativen Gesamtsystem mit Biomasse als CO_2 - bzw. Kohlenstoffquelle (Abb. 7).

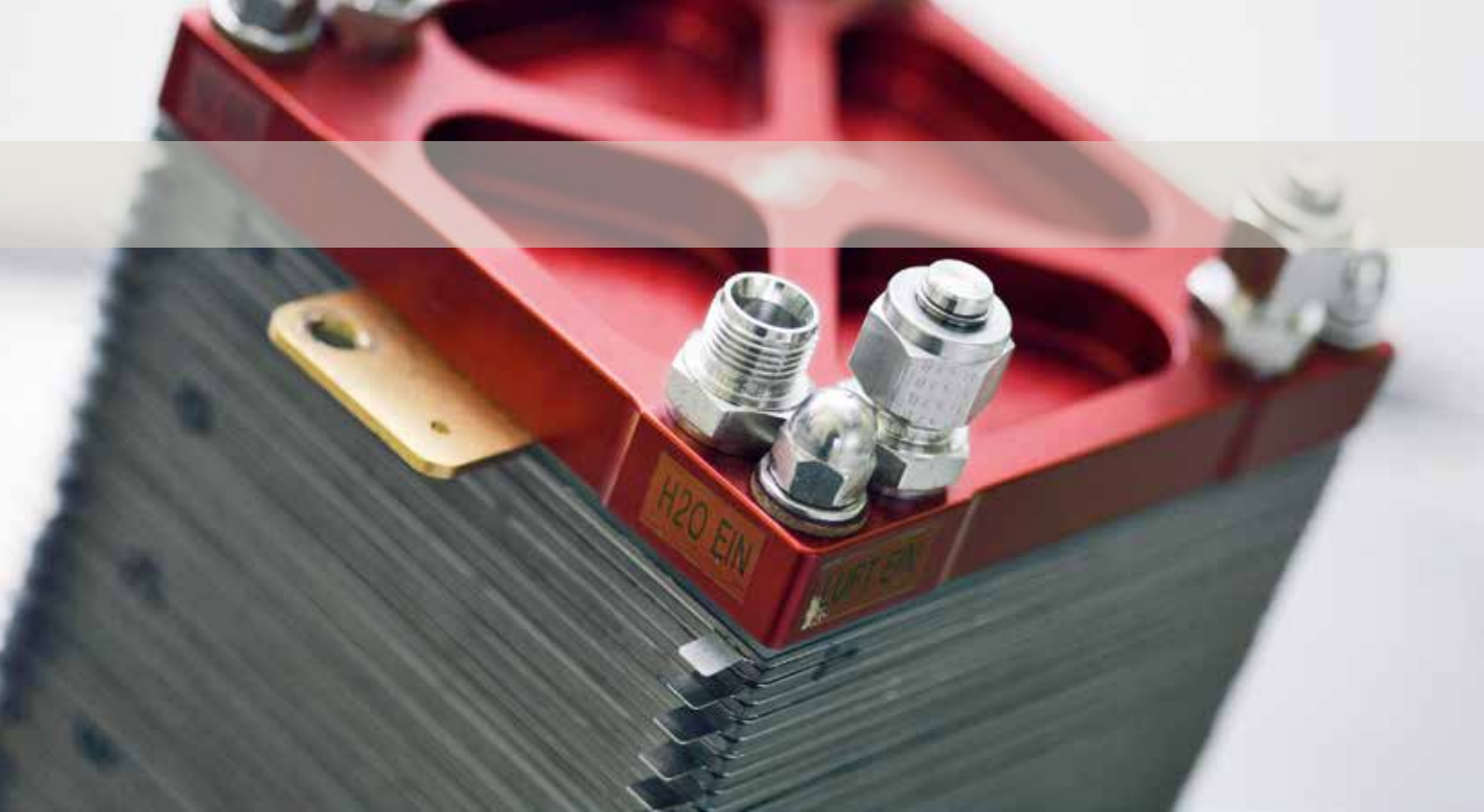
Bei der Power-to-Gas-Technologie wird durch Einsatz von regenerativem, fluktuierend anfallendem Strom etwa aus Wind- oder PV-Anlagen mittels Elektrolyse erneuerbarer Wasserstoff erzeugt. Dieser kann direkt genutzt oder in einem nachgeschalteten Prozessschritt unter Zugabe von CO_2 zu einem Erdgassubstitut (SNG: Substitute Natural Gas) umgewandelt werden. Das ZSW entwickelt hierfür sowohl Elektrolyseure als auch Synthesereaktoren. Zur Erzeugung gasförmiger Energieträger aus Biomasse (Biomass-to-Gas) kommen die anaerobe Vergärung und die thermochemische Konversion in Frage. Bei der thermochemischen Vergasung wird der Kohlenstoff der Biomasse nahezu vollständig in die Gasphase überführt. Um aus diesem Kohlenstoff möglichst viel Methan gewinnen zu können, muss in den Prozess Wasserstoff aus der

mortem analyses as well as on electrical and thermal battery system technology.

// Renewable energy sources: from electricity to fuels

The existing electricity supply is essentially a “one-way street” from the “fuel” energy segment to the “electricity” energy segment via fossil-fuel power stations and CHP plants (Fig. 2). This route for generating electricity creates CO_2 . A substantial part of the activities at ZSW consists in developing processes and systems that open up the reverse route, i.e. generating fuels using energy from the electricity sector. CO_2 from existing sources is bound in on route from the “electricity” segment to the “fuel” segment, and is then released again when the fuel is used. The process is therefore CO_2 -neutral. The work at ZSW is focussing on a renewable overall system with biomass as the CO_2 or carbon source (Fig. 7).

Power-to-Gas technology uses renewable, fluctuating electricity from, for example, wind or PV systems to generate hydrogen by means of electrolysis. This can be used directly or, with the addition of CO_2 , converted into substitute natural gas (SNG) in a downstream process. For this purpose ZSW is developing both electrolyzers and synthesis reactors. The generation of gaseous fuels from biomass (Biomass-to-Gas) requires anaerobic digestion or thermochemical conversion. With thermochemical gasification, the carbon in the biomass is almost completely transferred to the gas phase. In order to gain as much methane as possible from this carbon, hydrogen needs to be coupled into the process from the electrolysis. By cleverly combining the Power-to-Gas process and biomass gasification it is possible to increase the fuel yield in view of methane production by a factor of three. Compared with biodiesel and bioethanol, this enables the fuel yields to be increased by up to ten times, which considerably extends the range of the limited biomass resources. This is even more important given that there is considerable competition for using biomass, whereby in addition to its use as food and as a building material, it is also required as a raw material for the chemical industry.



// Focus

Quelle: Callux
Source: Callux



Elektrolyse eingekoppelt werden. Durch eine geschickte Verfahrenskombination von Power-to-Gas und Biomassevergasung kann der Kraftstofftrag bei der Methanherzeugung um den Faktor drei erhöht werden. Im Vergleich zu Biodiesel und Bioethanol lassen sich auf diese Weise bis zu zehnfach höhere Kraftstoffträge erzielen, was zu einer deutlichen Reichweitenverlängerung der limitierten Biomasseressourcen führt. Das ist umso wichtiger, als die Biomasse einer starken Nutzungskonkurrenz unterliegt und neben der Ernährung und als Baumaterial auch als Rohstoff für die chemische Industrie benötigt wird.

Mit jedem weiteren Schritt von der Wasserstoffherzeugung über die Methanisierung bis hin zur Herstellung flüssiger Kraftstoffe aus Strom, Wasser, CO₂ bzw. Biomasse steigen der technologische Aufwand und die energetischen Verluste. Wann immer die Möglichkeit besteht, sollte daher zunächst regenerativer Wasserstoff genutzt werden. So kann Wasserstoff direkt in Brennstoffzellenfahrzeugen oder für die Wärme- und (erneute) Stromerzeugung verwendet werden. Es gilt, die heute hohen Kosten durch technologische Weiterentwicklungen und die Serienfertigung von Elektrolyseuren zu reduzieren. Darüber hinaus muss die fehlende Infrastruktur für den Transport, die Speicherung und Verteilung von Wasserstoff ausgebaut werden. Für das gleichzeitige Beschreiten des parallelen Pfads durch die oben beschriebene Methanisierung des Wasserstoffs, um eine bereits bestehende Infrastruktur nutzen zu können, spricht das deutsche Erdgasnetz mit seinen insgesamt rund 420.000 Kilometern Leitungen und der Speicherkapazität von 220 TWh.

// Brennstoffzelle: vom Brennstoff zu Strom und Wärme

Brennstoffzellen erlauben eine direkte und effiziente Wandlung der in Wasserstoff (reinem Wasserstoff oder aus CH₄ gewonnenem) gespeicherten chemischen Energie in elektrischen Strom. Entsprechend vielseitig ist das Einsatzspektrum von portablen

The technological effort and energy losses increase with every further stage from hydrogen generation and methanisation to the production of liquid fuels from electricity, water, CO₂ and biomass. Therefore renewable hydrogen should be used first of all whenever possible. For example, hydrogen can be used directly in fuel cell vehicles or for generating heat and (re)generating electricity. It is important to reduce the current high costs through further technological development and the series production of electrolyzers. In addition, the lacking infrastructure for transporting, storing and distributing hydrogen must be developed. Simultaneously taking the parallel path of methanising hydrogen as described above enables an already existing infrastructure to be used in the form of the German natural gas network, which has 420,000 kilometres of pipelines and a storage capacity of 220 TWh.

// Fuel cells: from fuels to electricity and heat

Fuel cells enable the chemical energy stored in hydrogen (pure hydrogen or derived from methane) to be directly and efficiently converted into electrical power. The range of possible uses is correspondingly large, ranging from portable and stationary systems for supplying electricity to drive systems for vehicles. Fuel cells are differentiated according to the electrolytes and the working temperature. The research work at ZSW is focussing on polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) that can be used in all aforementioned application areas.

A substantial driver for developing fuel cells is the requirement for energy saving, emission-free mobility. Electrical drive systems with fuel cells offer operating distances and refuelling times comparable with conventional vehicles. Although the use of fuel cells in vehicles poses considerable challenges in terms of the power density, robustness and costs, considerable progress has been made in these areas in the last few years, and the operability and reliability of the technology has been demonstrated with the vehicles undergoing testing.

über stationäre Systeme zur Stromversorgung bis zum Antrieb von Fahrzeugen. Brennstoffzellen werden nach den eingesetzten Elektrolyten und der Arbeitstemperatur differenziert. Die Forschungsarbeiten am ZSW konzentrieren sich auf die sogenannte Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEMFC), die in allen genannten Anwendungsfeldern eingesetzt werden kann.

Ein wesentlicher Treiber der Brennstoffzellenentwicklung ist der Bedarf nach energiesparender, emissionsfreier Mobilität. Elektrische Antriebe mit Brennstoffzellen bieten Reichweiten und Betankungszeiten, die mit denen konventioneller Fahrzeuge vergleichbar sind. Der Einsatz von Brennstoffzellen im Automobil stellt erhebliche Anforderungen im Hinblick auf Leistungsdichte, Robustheit und Kosten. Auf diesen Gebieten konnten in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte erzielt werden und mit den im Feld befindlichen Fahrzeugen die Funktionsfähigkeit und Verlässlichkeit der Technologie gezeigt werden.

Die Erkenntnisse aus Grundlagenstudien und Modellrechnungen fließen in die Konstruktion von Brennstoffzellenstacks ein. Am ZSW stehen insgesamt drei Stackplattformen für die Anwendungsfelder Fahrzeugantrieb, Hausenergieversorgung und portable Stromerzeuger sowie eine Plattform zur Hochtemperatur-PEMFC zur Verfügung. Sie werden kontinuierlich verbessert und können als Basis für die Qualifikation neuer Materialien und Komponenten in Kooperation mit Partnern aus Industrie und Forschung eingesetzt werden. Kostenreduktion ist eine wesentliche Erfolgsvoraussetzung für den Einsatz von Brennstoffzellen. Hierzu tragen sowohl kostengünstigere Materialien als auch höhere spezifische Leistungen bei. Das ZSW untersucht dazu gemeinsam mit Partnern neue Kombinationen von Elektrolytmembranen und Katalysatoren. Die Integration von Brennstoffzellenstacks zu Systemen sowie der anwendungsnahe Test von Brennstoffzellenstacks und -systemen bilden einen weiteren Schwerpunkt der Arbeiten. Hierfür stehen umfangreiche Prüfeinrichtungen zur Verfügung.

Den Einsatz von erdgasbetriebenen Brennstoffzellen zur Hausenergieversorgung begleitet das ZSW als Koordinator im Projekt „Callux“. Die seit Projektbeginn 2008 installierten mehr als 300 Brennstoffzellen-Heizgeräte sorgen im Haus hocheffizient und umweltschonend für Wärme und Strom. Das Projekt wird im Rahmen des „Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ (NIP) von der Bundesregierung gefördert.

The knowledge gained from baseline studies and model calculations is incorporated into the construction of fuel cells. At ZSW, three stack platforms are available for vehicle drives, residential heat and power supply and portable electricity generators as well as a platform for high-temperature PEMFCs. All of them are being continually improved and can be deployed as the basis for qualifying new materials and components in cooperation with partners from industry and research. Reducing costs will be a substantial prerequisite for the successful use of fuel cells, whereby cheaper materials and higher specific outputs will make an important contribution. Together with partners, ZSW is therefore investigating new combinations of electrolyte membranes and catalysts. A further focus of the work is on integrating fuel cell stacks into systems and the application-related testing of fuel cell stacks and systems. Comprehensive testing facilities are available for this purpose.

ZSW is monitoring the use of natural gas-operated fuel cells for supplying domestic energy as the coordinator of the “Callux” project. The more than 300 fuel cell heating devices that have been installed since the beginning of the project in 2008 provide highly efficient and environmentally friendly heat and electricity for households. The project is being funded by the German government as part of its “Hydrogen and fuel cell technology” (NIP) national innovation programme.

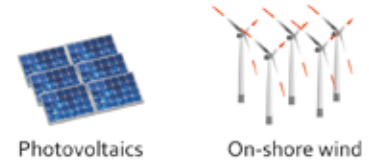
The energy suppliers as well as the equipment manufacturers are conducting comprehensive field tests in the Callux project to test the practicability of the domestic energy systems and push their further development to form reliable systems ready for the market. Parallel to this, the joint development of supporting measures is speeding up their widespread market introduction. These include the development of a uniform communication interface (including for operating the devices in future virtual power plants), testing training concepts for specialist trades and market research activities.

Power Balancing through Energy Conversion and Storage

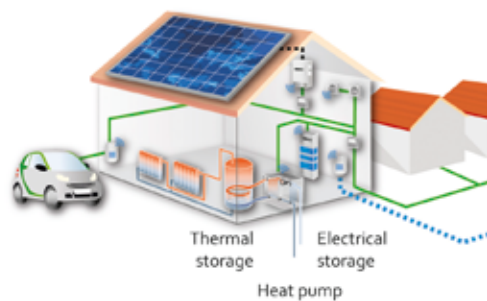
Large-scale power plants



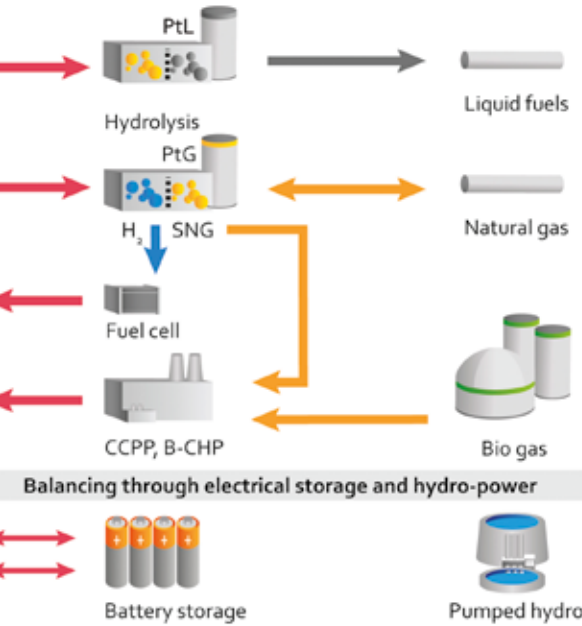
Distributed fluctuating generation



Local generation, storage and load management



Balancing through coupling of electricity and fuel sectors



Balancing through electrical storage and hydro-power



Regional control & tariffs

// Abb. 8: Veranschaulichung der Lastflüsse im Energiesystem zur Angleichung der zum Teil fluktuierenden Erzeugung und des zeitabhängigen Verbrauchs durch Speicherung (SNG: Substitute Natural Gas/erneuerbares Methan, PtG: Power-to-Gas, PtL: Power-to-Liquid), Lastmanagement und schnell regelbare Stromerzeugung durch Gaskraftwerke (CCPP: Combined Cycle Power Plant = GuD) oder Blockheizkraftwerke (B-CHP: Block-type Combined Heat and Power = BHKW).

// Fig. 8: Diagram depicting the load flows and communication routes in the energy system for balancing the partly fluctuating generation and time-dependent consumption of electricity by means of storage (SNG: Substitute Natural Gas / renewable methane, PtG: Power-to-Gas, PtL: Power-to-Liquid), load management and rapid power balancing using CCPP (Combined Cycle Power Plant) and B-CHP (Block-type Combined Heat and Power) plants.

Die Energieversorger sowie die Gerätehersteller führen in Callux umfangreiche Feldtests durch, um die Praxistauglichkeit der Haus-energiesysteme zu erproben und ihre Weiterentwicklung zu zuverlässigen und marktreifen Systemen voranzutreiben. Parallel wird durch die gemeinsame Bearbeitung begleitender Maßnahmen eine breite Markteinführung forciert. Hierzu zählen u. a. die Entwicklung einer einheitlichen Kommunikationsschnittstelle (auch für einen zukünftigen Betrieb der Geräte in virtuellen Kraftwerken), die Erprobung von Schulungskonzepten für das Handwerk sowie Marktforschungsaktivitäten.

// Technologien für Verkehr und Mobilität

Am Beispiel der Mobilität wird die Bedeutung gespeicherter Energie aus regenerativen Quellen für die Energiewende besonders deutlich. Denn abgesehen vom Schienenverkehr kann nur gespeicherte Energie in Form von Kraftstoffen oder Batteriestrom zur Anwendung kommen. Die notwendige Umstellung auf regenerativ erzeugte Kraftstoffe und neue Antriebstechnologien bringt erheblichen Entwicklungsaufwand und Innovationsbedarf mit sich. Der Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr (2011: 5,5 %) basiert heute fast ausschließlich auf Biokraftstoffen der ersten Generation, vorrangig Biodiesel und Bioethanol. Deren Grenzen hinsichtlich

// Technologies for transport and mobility

The importance of stored energy from renewable sources for the energy revolution is particularly evident with regard to mobility. This is because, with the exception of rail transport, it is only possible to use energy that is stored in the form of fuels or battery power. The necessary conversion to renewably generated fuels and new drive technologies requires considerable development efforts and innovation. The proportion of renewable energies used in transport (2011: 5.5%) is currently almost solely based on first-generation biofuels, these being principally biodiesel and bioethanol. Their limitations in terms of protecting the climate and utilisation potential have been sufficiently discussed in recent years.

The development of electromobility is seen as providing an initial, highly promising route for increasing the proportion of renewable energies and the energy efficiency in transport. However, the restricted operating distance of purely electric battery-powered vehicles only enables a particular market segment to be developed. An alternative is provided by fuel cells in vehicles that can make efficient use of hydrogen generated from electricity as the energy source. With heavy goods transport, shipping and aviation, on the other hand, it is only possible to use liquid fuels with a high energy



ihre klimaentlastenden Wirkung und ihrer Nutzungspotenziale wurden in den letzten Jahren hinreichend diskutiert. Ein erster vielversprechender Pfad zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien und zur Erhöhung der Energieeffizienz im Verkehr wird in der Entwicklung der Elektromobilität gesehen. Die begrenzte Reichweite von rein batterieelektrischen Fahrzeugen erschließt jedoch nur ein bestimmtes Marktsegment. Als zweiter Pfad stellt die Brennstoffzelle im Fahrzeug eine Alternative dar, die mit hohem Wirkungsgrad aus Strom erzeugten Wasserstoff als Energiequelle verwenden kann. Im Schwerlast-, Schiffs- oder Flugverkehr kommen hingegen nur flüssige Kraftstoffe mit hoher Energiedichte in Frage. Angesichts der begrenzten Biomasseressourcen arbeitet das ZSW auch am Power-to-Liquid-Verfahren als dritter Option, um unter Mitwirkung von Strom als Energielieferanten (Abb. 7.) das Portfolio von regenerativen, flüssigen Kraftstoffen zu erweitern.

Durch die Verwendung des Stroms zur Kraftstoffherstellung steigt der Bedarf an erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten aus Sonne und Wind deutlich über das Maß hinaus, das basierend auf dem heutigen Gesamtstrombedarf notwendig ist. Was heute gerne als „Überschussproduktion“ bezeichnet wird, bezieht sich auf die Stromerzeugung, die über die im heutigen Stromsektor benötigte elektrische Momentanleistung hinausgeht. Durch die Bedarfe im Wärme- und Kraftstoffsegment wird dieser „Überschuss“ zur Notwendigkeit. Die Kopplung des Strom-, Wärme- und Kraftstoffsegments liefert schließlich die Methoden zur Anpassung des augenblicklichen Strombedarfs an die fluktuierende Erzeugung von Strom aus Sonne und Wind (Abb. 8).

density. In view of the limited biomass resources, ZSW is also working on Power-to-Liquid processes as a third option in order to expand the portfolio of renewable liquid fuels by using electricity as an energy supplier (Fig. 7).

Through using electricity for generating fuels, the need for renewable electricity generation capacities from the sun and wind increases significantly beyond the extent that is necessary based on the current total electricity demand. What is often commonly known as “surplus production” refers to electricity generation that exceeds the electrical power instantaneously required in the current electricity sector. The demands in the heating and fuel segment will turn this “surplus” into a necessity. The coupling of the electricity, heat and fuel segments will ultimately provide the methods for adapting the instantaneous electricity demand to the fluctuating generation of electricity from the sun and wind (Fig. 8).

// Contact

Dr. Jann Binder

E-mail: jann.binder@zsw-bw.de

Phone: +49(0)711 78 70-209

A large school of silver fish, possibly sardines or anchovies, swimming in clear blue water. The fish are densely packed and move in a coordinated pattern, creating a shimmering effect. The water is a vibrant blue, and the fish have a silvery, metallic sheen.

// Fachgebiete und Projekte
Departments and Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Die Entwicklung einsatzfähiger Energiewandlungs- und Speichertechnologien ist nur ein erster Schritt auf dem Weg zur Energiewende. Technische Lösungen sind im Hinblick auf ihre Potenziale zu beurteilen und es müssen Strategien und Szenarien für ihren Einsatz entwickelt werden. Anschließend kommt es darauf an, die Technologien mit geeigneten Förderinstrumenten in den Markt einzuführen und ihre Leistungsfähigkeit für das Energiesystem im Einsatz zu überprüfen. Für die Evaluierung der Markteinführung muss ein regelmäßiges Monitoring durchgeführt werden, das auch ökonomische und ökologische Wirkungen umfasst und dessen Ergebnisse dazu verwendet werden, die Förderpraxis regelmäßig zu überprüfen und anzupassen.

Die Entwicklung und Begleitung dieser Prozesse gehören zur Kernkompetenz des interdisziplinären Wissenschaftlerteams des Fachgebiets Systemanalyse. So verfügt das Team über umfangreiche Erfahrungen bei der Evaluierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG). Seit fast einem Jahrzehnt koordiniert und leitet das Fachgebiet die vom Bundesumweltministerium eingerichtete Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat). In diesem Zusammenhang verantwortet es das Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland und unterstützt die Bundesregierung u. a. bei internationalen Berichtspflichten. Auf der Grundlage dieser Erfahrungen, ergänzt durch Kompetenzen in ökonomischen Analysen, der Modellierung des Strommarktes sowie der Entwicklung und Anwendung leistungsfähiger Wind- und Solarstromleistungsvorhersagen, zeigt das Team im Rahmen seiner Politikberatung auf Bundes- und Landesebene auf, wie die Energiewende gelingen kann und welche ökonomischen Chancen für den Standort Deutschland damit verbunden sind.



// Contact

Dr. Frank Musiol
E-mail: frank.musiol@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-217

// Our main focus

The development of deployable energy conversion and storage technologies is only the first step in achieving the energy revolution. Technical solutions have to be evaluated with regard to their potential and strategies and scenarios for their use have to be developed. It is then important to introduce the technologies to the market with suitable funding instruments and to verify their performance capability in relation to the energy system during operation. To evaluate their market introduction, regular monitoring that also encompasses the economic and ecological effects is necessary, and the results should be used to regularly check and adapt the funding practice.

The development and monitoring of these processes are among the core competences provided by the interdisciplinary team of scientists in the Systems Analysis research department. For example, the team has extensive experience in evaluating the German Renewable Energy Sources Act (EEG). For almost a decade, the research department has coordinated and led the Working Group on Renewable Energy – Statistics (AGEE-Stat) set up by the German Federal Ministry of the Environment. In this context, it is responsible for monitoring the development of renewable energies in Germany and supports the German government, for example, in meeting international reporting obligations. Based on this experience and supplemented by its expertise in economic analyses, modelling the electricity market and developing and applying powerful wind and solar power output forecasts, the team shows how the energy revolution can succeed and what economic opportunities it offers for Germany, in the context of its advisory role for policy at the national and regional level.

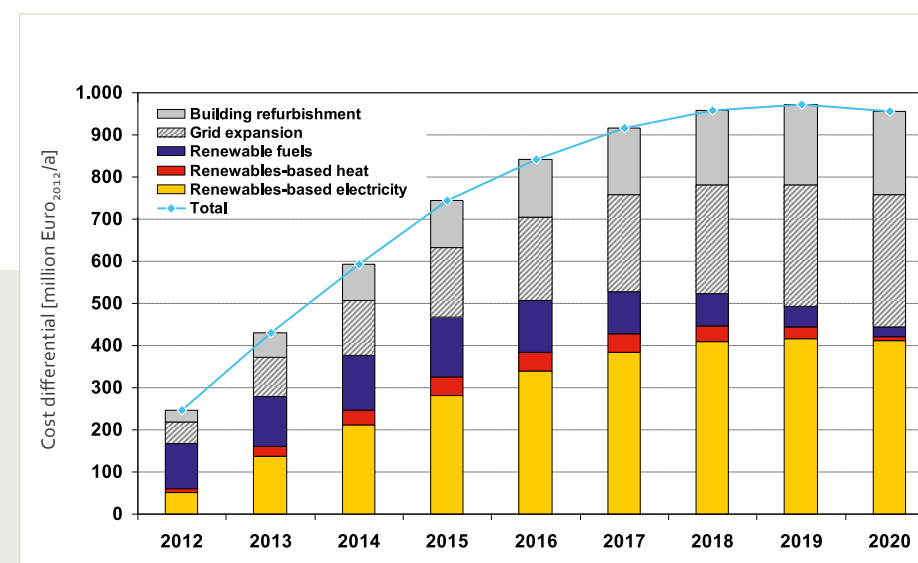
// Kosten-Nutzen-Analyse Cost-benefit analysis

// Energieszenario für Baden-Württemberg: Gutachten zur Abschätzung ökonomischer Wirkungen des Klimaschutzgesetzes

Aufbauend auf dem für das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft im Vorjahr erarbeiteten Gutachten zur Vorbereitung eines Klimaschutzgesetzes erstellte das Fachgebiet Systemanalyse eine erste Abschätzung ausgewählter ökonomischer Wirkungen des Gesetzes.

Zur Bewertung der ökonomischen Wirkungen wurden die systemanalytischen Kosten- und Nutzeneffekte, Verteilungseffekte und ausgewählte makroökonomische Effekte (z. B. Bruttobeschäftigung) herangezogen, die jeweils eine direkte Gegenüberstellung sowohl positiver als auch negativer Wirkungen erlauben. Im Mittelpunkt steht die Bewertung von Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen sowie die Steigerung der Energieeffizienz im Wohngebäudektor durch Sanierungsmaßnahmen, denen die größte Bedeutung für das Erreichen der Ziele des Klimaschutzgesetzes bis 2020 zukommt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die zusätzlichen Differenzkosten zunächst steigen, aber bereits ab 2020 wieder eine rückläufige Tendenz aufweisen (siehe Abb.). Von diesen Kosten ist jedoch nur ein Teil den Aktivitäten des Landes zuzurechnen, dazu zählen insbesondere der beschleunigte Ausbau der Windenergie durch die Änderung des Landesplanungsgesetzes und das Wärmegesetz. Es zeigt sich, dass die zusätzlichen durch ein Klimaschutzgesetz induzierten Kosten insgesamt als vergleichsweise gering einzustufen sind.



// Entwicklung der gesamten systemanalytischen Differenzkosten für Maßnahmen im Zeitraum 2012–2020. (Die Differenzkosten bilden die mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien verbundenen gesamtwirtschaftlichen Mehr- bzw. Minderkosten im Vergleich zur konventionellen Energieversorgung ab.)
// Development of the system-analytical differential costs for developing renewable energies in the period 2012–2020. (The differential costs describe the overall increased or reduced economic costs associated with the development of renewable energies in comparison with conventional energy provision.)

// Contact

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

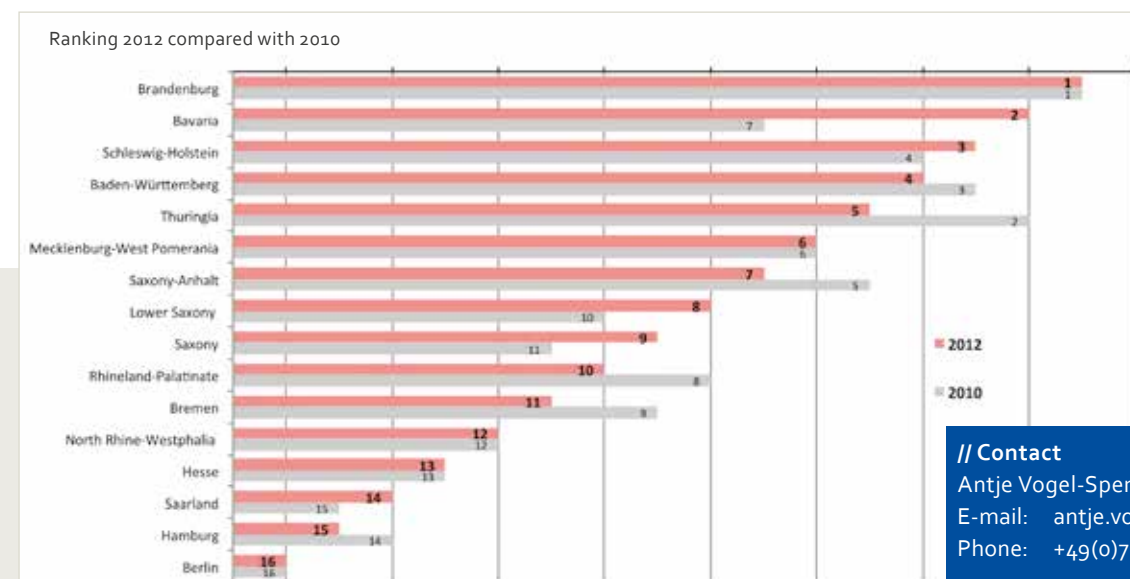
// Vergleich der Bundesländer

Comparison of the federal states

// Vergleich der Bundesländer: Analyse der Erfolgsfaktoren für den Ausbau der erneuerbaren Energien 2012 – Indikatoren und Ranking

Den Bundesländern kommt eine bedeutende Rolle beim Ausbau der erneuerbaren Energien und beim Gelingen der Energiewende insgesamt zu. Denn die Umsetzung nationaler und EU-weiter Ziele muss letztlich „vor Ort“ erfolgen. Die Bundesländer verfügen über Handlungsspielräume, indem sie eigene Ausbauziele festlegen, rechtliche sowie administrative Rahmenbedingungen gestalten und Förderprogramme auflegen. Auch industriepolitisch sind Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien für die Bundesländer von großem Interesse, weil mit dem Strukturwandel eine Steigerung der regionalen Wertschöpfung einhergehen kann.

Das Fachgebiet Systemanalyse hat im Jahr 2012 gemeinsam mit dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien zum dritten Mal einen Bundesländervergleich erstellt. Er basiert auf insgesamt 53 Indikatoren zu Anstrengungen und Erfolgen auf Länderebene, wobei sowohl energie- und umweltpolitische Faktoren der Nutzung erneuerbarer Energien als auch technologie- und industriepolitische Aspekte einbezogen werden. Die einzelnen Indikatoren werden für das Ranking zu Gruppenindikatoren und einem Gesamtindikator zusammengefasst. In der Gesamtbewertung führt erneut das Land Brandenburg (siehe Abb.). Die Studie zeigt, wie erfolgreich einzelne Bundesländer beim Ausbau erneuerbarer Energien bisher sind, welche unterschiedlichen Schwerpunkte sie setzen und wie sie unter Berücksichtigung von Erfahrungen anderer Länder künftig noch erfolgreicher werden können.



// Contact

Antje Vogel-Sperl

E-mail: antje.vogel-sperl@zsw-bw.de

Phone: +49(0)711 7870-229

// Vergleich der Bundesländer: Analyse und Erfolgsfaktoren für den Ausbau der erneuerbaren Energien.

// Comparison between the federal states: Analysis and success factors for the development of renewable energies in 2012.

// Comparison of the federal states: analysis of the success factors for developing renewable energies in 2012 – indicators and ranking

The German federal states play an important role in developing renewable energies and in achieving the energy revolution, since the implementation of national and EU-wide goals ultimately has to be achieved at the local level. The federal states are given scope for action in that they can determine their own development goals, define legal and administrative frameworks and set up funding programmes. In terms of industrial policy, technologies for using renewable energies are also of considerable interest for the federal states because the structural changes can increase the regional value creation.

On behalf of the Renewable Energies Agency, in 2012, the Systems Analysis research department produced a comparison of the German federal states for the third time, in conjunction with the German Institute for Economical Research (DIW) Berlin. This is based on a total of 53 indicators that show the efforts and successes achieved at the regional state level, whereby it draws upon both energy and environmental policy factors in using renewable energies as well as policy aspects related to technology and industry. For ranking purposes, the individual indicators are collated to provide group indicators and an overall indicator. The Federal State of Brandenburg once again leads the ranking (see figure below). The study shows the previous successes of individual federal states in developing renewable energies, their different focal points and how they can be even more successful in future by drawing upon the experiences of other federal states.

// P²IONEER

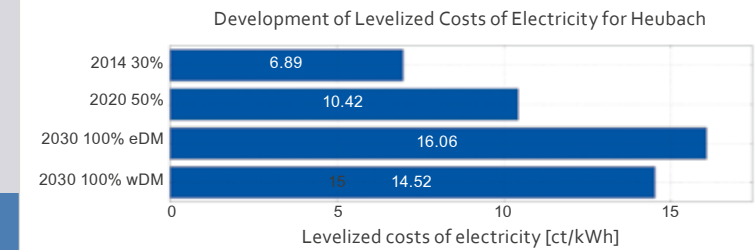
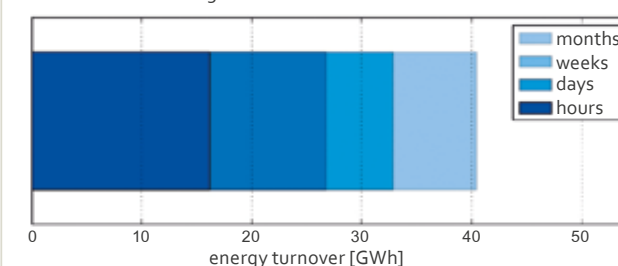
P²IONEER
Virtual Power Plant Optimisation

// Simulation und Optimierung von virtuellen und Hybridkraftwerken mit dem Modell P²IONEER

Das Modell P²IONEER (Power Plant Integration and Optimisation of climate NEutral Energy Resources) wurde in den vergangenen zwei Jahren am Fachgebiet Systemanalyse entwickelt. Das Modell umfasst die Simulation von energieautarken Regionen mit bis zu 100 % Durchdringungsgrad von erneuerbaren Energien (EE) und die Kostenoptimierung des Erzeugungsmixes. Als notwendige Eingangsdaten für P²IONEER werden Zeitreihen der Erzeugungsdaten von Wind- und PV-Kraftwerken sowie Lastdaten des Stromverbrauchs der betrachteten Region herangezogen. Damit ist P²IONEER in der Lage, das notwendige Energiesystem für die Stromversorgung einer Region mit EE, bestehend aus Wind-, PV- und Biomassekraftwerken als EE-Erzeugern, BHKW und/oder GuD-Anlagen als konventionellen Erzeugern sowie notwendigen Speichern (P₂G®, Batterien) kostenoptimal so zu dimensionieren, dass die Stromversorgung zu jeder Zeit gewährleistet ist. Der Grad der gewünschten EE-Durchdringung kann dabei frei vorgegeben werden.

Nach Beendigung der Optimierung sind nicht nur die kostenoptimal zu installierenden Kapazitäten der EE sowie der konventionellen Erzeuger und Speicher bekannt, sondern es können auch andere interessante Daten direkt aus der Simulation extrahiert werden. Dies sind z. B. die Energieflüsse in zeitlicher Auflösung (typischerweise 15 Minuten), die mittlere Speicherdauer für die eingesetzten Speichertechnologien sowie Lastprofile der unterschiedlichen Technologien. Im Rahmen einer Studie wurde mit P²IONEER ein Ausbauszenario für die 100 %-EE-Versorgung der Stadt Heubach in Zusammenarbeit mit einem Unternehmen simuliert und optimiert. Es wurde ein Ausbauplan unter den gegebenen lokalen Randbedingungen des möglichen PV- und Windpotenzials und mit realen Lastdaten entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass die Stadt Heubach im Jahr 2030 zu moderaten Kosten zu jeder Zeit zu 100 % mit EE versorgt werden könnte.

Distribution of Storage-Durations



// Stromgestehungskosten für den Ausbaupfad der Stromversorgung der Stadt Heubach mit bis zu 100 % EE-Versorgung. Für den Endausbau im Jahr 2030 wurde ein Szenario mit und ohne Direktvermarktung (wDM/eDM) von Stromüberschüssen simuliert und optimiert.

// Levelized costs for the development path for supplying electricity to the town of Heubach with up to 100% renewable energy provision. A scenario with and without the direct marketing (wDM/eDM) of surplus electricity was simulated and optimised for the final expansion in 2030.

// Simulation and optimisation of virtual and hybrid power plants with the P²IONEER model

The P²IONEER model (Power Plant Integration and Optimisation of climate NEutral Energy Resources) has been developed at the Systems Analysis research department during the last two years. The model covers the simulation of energy-independent regions with up to 100% renewable energy penetration and the optimisation of the levelized costs of electricity mix. Time series for the generation data from wind and PV power plants as well as load data for the electricity consumption in the regions observed are used as necessary input data for P²IONEER. This enables P²IONEER to size the necessary energy system for supplying a region with electricity from wind, PV and biomass power plants as renewable energy generators and from CHP and/or CCGT power plants as conventional generators in combination with the necessary storage systems (P₂G®, batteries) in a cost effective manner that ensures that the electricity supply is secured at all times. The degree of renewable energy penetration can be freely defined.

Once the optimisation has been completed, not only do the most cost-effective renewable energy capacities to be installed along with conventional generators and storage systems become apparent, it is also possible to extract other interesting data from the simulation. This data includes, for example, the energy flows in a temporal resolution (typically 15 minutes), the average storage duration of the storage technologies deployed and the load profile of the different technologies. As part of a study, a development scenario for supplying the town of Heubach with 100% renewables was simulated and optimised using P²IONEER in collaboration with a private company. A development plan was produced that takes into account the existing local conditions in regard to possible PV and wind potentials and uses real load data. It has been able to show that, for a moderate outlay, the town of Heubach could be supplied with 100% renewables at all times in 2030.

// Mittlere Speicherdauer von P₂G®-Gas für eine 100 %-EE-Versorgung der Stadt Heubach im Jahr 2030 für das Szenario mit Direktvermarktung.

// Average storage duration of P₂G® gas for supplying 100% renewable energy to the town of Heubach in 2030 for the scenario with direct marketing.

// Contact

Anton Kaifel

E-mail: anton.kaifel@zsw-bw.de

Phone: +49(0)711 78 70-238

// 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 Technologie (CIGS) hat sich mit den höchsten Wirkungsgraden aller Dünnschicht-Technologien und einer weit entwickelten Fertigungstechnologie in der industriellen Produktion bewährt.

Das CIGS-Technikum des ZSW umfasst alle Maschinen und Anlagen, die erforderlich sind, um Dünnschicht-Solarmodule von der Vorbereitung der Glassubstrate bis hin zur Befestigung der Anschlusskabel am fertigen Modul herzustellen. Die Anlagen sind im Unterschied zu einem typischen Laborbetrieb weitgehend für Durchlaufprozesse ausgelegt, sodass eine große Nähe zu industriellen Verfahren gegeben ist (Arbeitsgruppe FACIS). Der Einsatz von flexiblen Substratmaterialien wie Polymer- oder Metallfolien anstelle des heute überwiegend eingesetzten Glassubstrates 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.

Neue kostengünstige Depositionsverfahren, z. B. Drucktechnologien, werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme 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 Analytaufgaben (z. B. hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse), die Abscheidung von elektrischen Kontaktschichten sowie die elektrische und optische Charakterisierung von Zellen und Modulen.



// Contact

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

// Our main focus

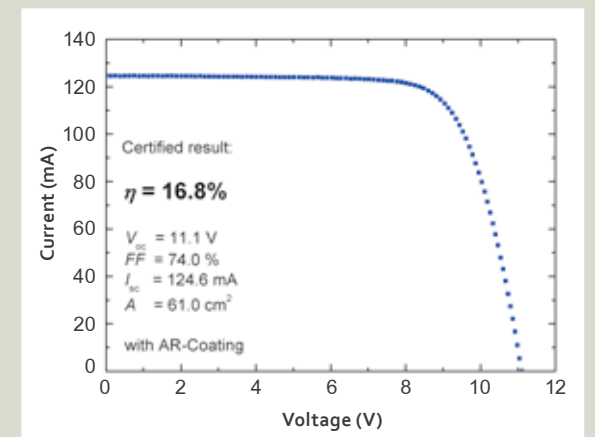
The use of thin-film technologies offers considerable potential for reducing the costs of photovoltaic modules. With the greatest efficiency of all thin-film technologies and a highly developed production technology, thin-film technology based on copper, indium, gallium and selenium (CIGS) has particularly proved itself in industrial production.

The ZSW's CIGS technical lab includes all the machines and systems necessary for producing thin-film solar modules, ranging from the preparation of the glass substrates to the fixing of the connection cables to the finished module. In contrast to laboratory operation, the systems are largely engineered for throughput processes and therefore closely mirror industrial processes (FACIS working group). The use of flexible substrate materials such as polymer and metal films instead of the glass substrates predominantly used today is being developed in a second technical lab for roll-to-roll coating. The manufacture and optimisation of these flexible CIGS modules form the focus of the FLEXIS working group.

New, cost-effective deposition processes such as print technologies are being developed for new organic and inorganic semiconductor systems in a dedicated laboratory (NEMA working group). The MAT team's many years of experience in developing CIGS thin-film solar modules is also being utilised in services offered to industry: on behalf of customers, we provide diverse analytical support (e.g. high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis), the deposition of electrical contact layers as well as the electrical and optical characterisation of cells and modules.

// CIGS-Technologie auf Glas CIGS technology on glass

// IU-Kennlinie des am Fraunhofer ISE zertifizierten Moduls der Größe 10 x 10 cm² mit Schichtaufbau CIGS/CdS/ZnO/ZnO:Al aus der Modullinie des ZSW.
// IV curve of a module (10 x 10 cm²) certified by Fraunhofer ISE with CIGS/CdS/ZnO/ZnO:Al layers from the ZSW module line.



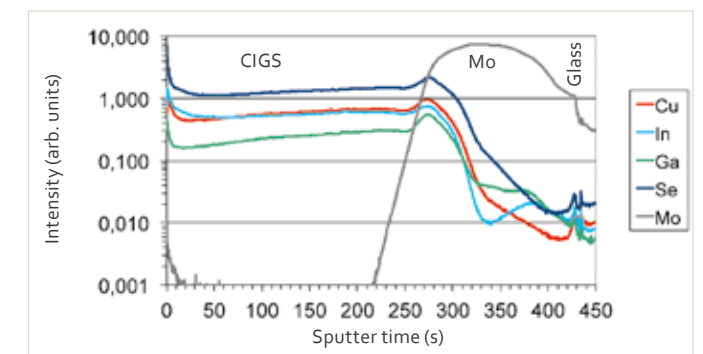
// Optimierung der CIGS-Modultechnologie

In der am ZSW verfügbaren Technikumlinie zur Herstellung von CIGS-Modulen bis zu einer Fläche von 30 x 30 cm² werden in industrienahen Prozessen, bei denen die Substratgläser kontinuierlich durch die Vakuumanlagen transportiert werden (sog. Inline-Prozesse), alle für eine industrielle Umsetzung notwendigen Prozessschritte verbessert. So konnte im Jahr 2012 durch die konsequente Weiterentwicklung aller Einzelprozesse im Inline-Betrieb (z. B. CIGS-Deposition, Verschaltung und Frontkontakt) auf einer Fläche von 10 x 10 cm² ein neuer, extern zertifizierter ZSW-Bestwert von $\eta = 16,8\%$ erzielt werden (siehe Abb. oben). Mit der Übertragung auf die Fläche von 30 x 30 cm² wurde begonnen, der ZSW-Bestwert liegt hier aktuell bei $\eta = 15,1\%$.

// Erweiterung der analytischen Methoden

Aus Mitteln des Landes Baden-Württemberg wurde die Materialanalytik im Fachgebiet um die Methode der optischen Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) erweitert. Hierdurch können dünne Schichten wie z. B. CIGS-Schichten in ihrer Zusammensetzung untersucht werden. Mit Hilfe eines Argon-Plasmas wird die Probe abgetragen und die hierbei erzeugten Atome emittieren Licht einer definierten Wellenlänge, das mit elementspezifischen Spektrometern detektiert wird. Die Messzeit korreliert hierbei ausgehend von der Probenoberfläche aufgrund des gleichmäßigen Materialabtrags mit der Probentiefe. Mit einer geeigneten Kalibrierung können mit GDOES nun Tiefenprofile in deutlich kürzerer Zeit bestimmt werden als mit dem bisher eingesetzten Verfahren SNMS (Sekundärneutraltteilchen-Massenspektrometrie).

// GDOES-Tiefenprofil an einer CIGS-Probe.
// GDOES depth profile on a CIGS sample.



// Optimising CIGS module technology

At the ZSW's technical lab line for producing CIGS modules up to 30 x 30 cm² in size, all process stages required for industrial implementation are optimised using industrial-scale processes in which the substrate glass is continually transported through the vacuum systems (so-called inline processes). This systematic further development of all individual processes in the inline operation (e.g. CIGS deposition, connections and front contact) enabled ZSW to achieve a new, externally certified best value of $\eta = 16.8\%$ in 2012 for a 10 x 10 cm² module (see figure above). This is now being transferred to an area of 30 x 30 cm², whereby ZSW's current best value is $\eta = 15.1\%$.

// Expansion of analytical methods

Using funding from the Federal State of Baden-Württemberg, the material analysis in the research department has been expanded to include methods involving glow discharge optical emission spectroscopy (GDOES). This enables the composition of thin films such as CIGS coatings to be studied. The sample is removed using an argon plasma, and the generated atoms emit light of a characteristic wavelength, which is detected with element-specific spectrometers. Starting from the sample surface, the uniform removal of material enables a direct correlation to be made between the measurement time and the sample depth. With suitable calibration, GDOES now enables depth profiles to be determined in a considerably shorter time span than with the previously used SNMS process (Secondary Neutral Mass Spectrometry).

”



// Dr. Wiltraud Wischmann

Preisdruck und Konsolidierung in der Photovoltaik haben sich 2012 noch verstärkt. In dieser Situation entwickelt die Materialforschung am ZSW noch effizientere Materialsysteme und Herstellungsverfahren, die zur Kostenreduktion beitragen.

Cost pressure and consolidation in the photovoltaic sector have become even greater in 2012. Given these circumstances, the Materials Research department at ZSW is developing even more efficient material systems and manufacturing processes to help reduce costs.

// Flexible Dünnschicht-Solarmodule

Flexible thin-film solar modules

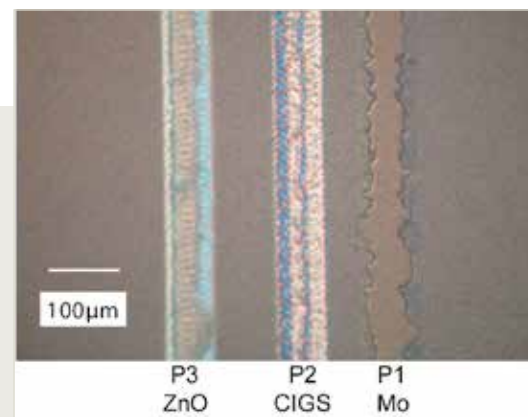


// Flexibles Modul mit 10 Zellen und 10,0 % Wirkungsgrad auf Polyimidfolie.
// Flexible module with 10 cells and 10.0% efficiency on polyimide film.

// CIGS-Koverdampfung auf alternative Substrate

Im Rahmen des vom ZSW koordinierten und 2012 beendeten EU-Projekts „hipoCIGS“ (New concepts for high efficiency and low cost in-line manufactured flexible CIGS solar cells) wurden mehrere potenziell kostengünstige, teilweise neuartige Substratmaterialien untersucht. So wurden etwa Baustahl, emailliertes Aluminium und emaillierter Stahl auf ihre Eignung für eine zukünftige CIGS-Koverdampfung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren getestet und – wo es sinnvoll erschien – weiterentwickelt. Aufgrund seiner unzureichenden Schichthaftung, aber auch wegen des relativ hohen Preises wurde emailliertes Aluminium als CIGS-Substrat wieder verworfen. Auf emaillierten Stahlsubstraten hingegen erzielte das ZSW in einer mehrstufigen Inline-CIGS-Beschichtung hohe Zellwirkungsgrade von 18,6 %. Zudem konnten damit mittels Meißel und Laser monolithisch verschaltete Submodule von 15,4 % (Substrat: 10 cm x 10 cm, 16 Zellen) hergestellt werden. Die Emailleschicht wurde dabei zusammen mit dem Hersteller so optimiert, dass sie bei hohen Temperaturen im Vakuum eingesetzt werden kann. Gleichzeitig dient sie als Natriumquelle, sodass keine externe Natriumzufuhr zur Absorberdotierung notwendig ist. Auch auf Baustahlfolie wurden erfolgreich Solarzellen abgeschieden. Aufgrund der ausgeprägteren Eisendiffusion im Vergleich zu Edelstahl und der Korrosionsanfälligkeit der Oberfläche (Rost) war hier eine zusätzliche Barrierschicht notwendig.

Die CIGS-Koverdampfung auf Polyimidfolie erfolgte entweder in einer Rolle-zu-Rolle-Pilotanlage oder in einer Inline-Laboranlage. Unter Verwendung eines Picosekunden-Lasers (angeschafft im PIPV2-Projekt, gefördert vom BMWi) und eines konventionellen Nanosekunden-Lasers konnte ein ausschließlich mittels Laser strukturiertes und monolithisch verschaltetes Submodul mit 10,0 % Wirkungsgrad bestehend aus 10 Zellen hergestellt werden (Abb. oben). Die Abbildung unten zeigt die drei mittels Laser gezogenen Strukturierungslinien P₁, P₂ und P₃ auf Polyimidfolie.



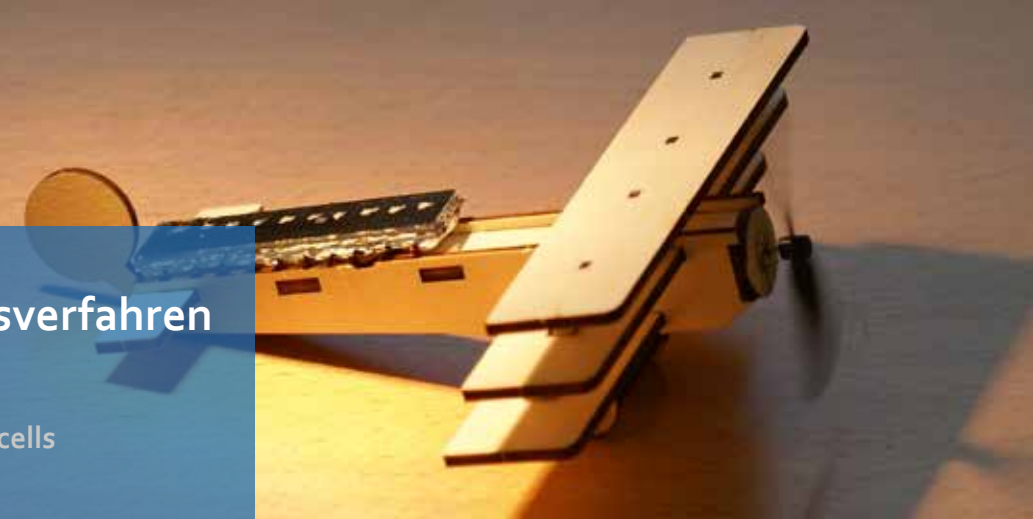
// Laserstrukturierung von Rückkontakt (P₁), Absorber (P₂) und Frontkontakt (P₃).
// Laser structuring of the rear contact (P₁), absorber (P₂) and front contact (P₃).

// Contact

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

// Neue Beschichtungsverfahren für Solarzellen

New coating processes for solar cells



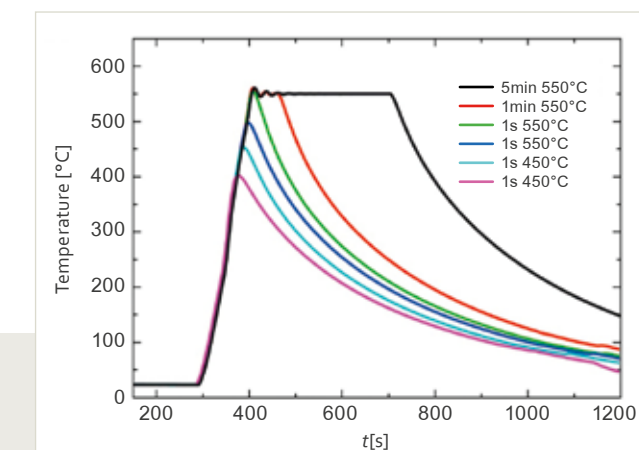
// Demonstrator eines Minimoduls mit einer CIGS-Schicht basierend auf vakuumfrei aufgetragenen Nanopartikeln.
// Demonstrator for a mini-module with a CIGS layer based on non-vacuum deposited nanoparticles.

// Vakuumfreie CIGS-Solarzellen-Präparation

Neben der klassischen CIGS-Abscheidung werden am ZSW kostengünstige vakuumfreie Beschichtungsmethoden aus der Lösung geeigneter Ausgangsmaterialien entwickelt. Hierbei können z. B. sulfidische Nanopartikel verwendet werden, die nach der Auftragung in einem sequenziellen Heizprozess unter Selenatmosphäre zu einer Cu(In,Ga)(S,Se)₂-Schicht umgewandelt werden.

Während des sogenannten Selenisierungsprozesses rekristallisieren die Nanopartikel, wobei ein Teil des Schwefels durch Selen ersetzt wird. Dadurch kommt es zu einer Verdichtung der Schichten. Diese Phasenumwandlung lässt sich sehr gut anhand einer Serie von unterschiedlichen Selenisierungsdauern in der Abbildung unten beobachten. Wenn der Heizprozess unter Selendampf bei sehr kurzen Zeiten bzw. niedrigen Temperaturen abgebrochen wird, ist zunächst die sulfidische Phase im Ramansignal der Oberfläche zu sehen. Bei hohen Temperaturen bzw. längeren Prozesszeiten bildet sich mehr und mehr das selenidische Signal heraus.

Mit diesem Materialsystem konnten Solarzellenwirkungsgrade von über 10 % demonstriert werden. Das reicht bereits aus, um einen kleinen Demonstrator zu betreiben, wie die Abbildung oben zeigt.



// Längere Selenisierungsprozesse (a) führen mit zunehmender Temperatur und Dauer zu einer Materialumwandlung von einer rein sulfidischen Phase Cu(In,Ga)S₂ zu einer zunehmend selenidischen Phase Cu(In,Ga)Se₂.

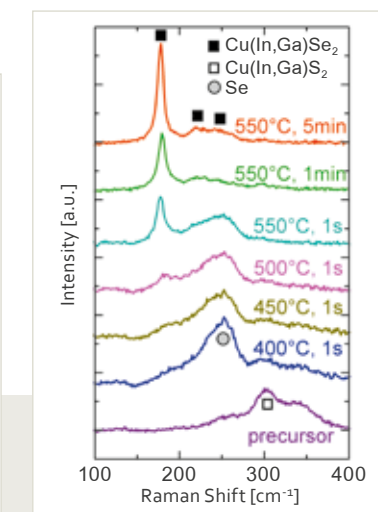
// With increasing temperature and duration, longer selenisation processes (a) cause the material to change from a purely sulphidic phase Cu(In,Ga)S₂ to an increasingly selenium phase Cu(In,Ga)Se₂.

// Non-vacuum preparation of CIGS solar cells

In addition to standard CIGS deposition, ZSW is also developing cost-effective, non-vacuum coating methods from solutions of suitable base materials. For example, sulphidic nanoparticles can be used which, once they have been deposited in a sequential heating process in a selenium atmosphere, are transformed into a Cu(In,Ga)(S,Se)₂ layer.

During the selenisation process, the nanoparticles recrystallise, whereby part of the sulphur is replaced with selenium. This causes the layers to be compacted. Using a series of different selenisation durations, this phase change can be very clearly observed in the figure below. If the heating process in the selenium vapour is interrupted after a very short time or at lower temperatures, the sulphidic phase can be initially seen in the Raman signal on the surface. At higher temperatures or longer process times, the selenium signal becomes more and more pronounced.

Solar cell efficiencies of more than 10% have been demonstrated using this material system. This is already sufficient to operate a small demonstrator, as shown by the image above.



// Contact

Dr. Erik Ahlswede
E-mail: erik.ahlswede@zsw-bw.de
Phone: +49 (0)711 7870-247

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

// Unsere Kernkompetenzen

Auf der Basis von über 20 Jahren Testerfahrung mit Photovoltaik (PV)-Modulen aus kristallinem Silizium (c-Si) und aus Dünnschichtmaterialien werden im Modultestlabor Solab Untersuchungen zum Energieertrag sowie zur Langzeitstabilität von PV-Modulen und -Systemen durchgeführt. Für die Charakterisierung der Modulstabilität werden Resultate aus beschleunigten Alterungstests im Labor mit Degradationseffekten unter Freifeld-Betriebsbedingungen korreliert. Neu entwickelte Verfahren zur Analyse von Freilandmessreihen ermöglichen es, auch im Schwachlichtbereich kleinste Degradationseffekte zu detektieren. Die prinzipiell bei allen Modultechnologien beobachtbare potenzialinduzierte Leistungsdegradation (PID) wird durch beschleunigte Alterung unter Hochspannung in der Klimakammer und an einem speziellen Teststand zur Messung von Modulleckströmen im Freifeld untersucht. Neben dem PV-Testfeld Widderstall steht ein Freifeld-Teststand in Spanien für die Modulcharakterisierung unter anderen Klimabedingungen zur Verfügung.

Die Experten des Fachgebiets arbeiten zudem an der Entwicklung von Testverfahren für flexible Solarmodule, um die bislang bestehenden PV-Normen zu erweitern. Weitere Arbeitsgebiete sind die optimierte Netzeinbindung von PV-Systemen in Verbindung mit elektrochemischen und thermischen Speichern, Feldtests von PV-Batteriesystemen und die Gebäudeintegration von PV-Modulen. Zur Beratungskompetenz des Fachgebiets gehören Prüfungen („Due Diligence“) von geplanten und bestehenden PV-Großanlagen im Auftrag finanzierender Banken, von Projektierern oder Betreibern. Darüber hinaus werden Standortbewertungen, Auslegungen von PV-Systemen, Ertragsgutachten und die Qualitätskontrolle von PV-Anlagen als kundenspezifische Dienstleistung angeboten.

// Our main focus

Based on 20 years of testing experience with photovoltaic (PV) modules from crystalline silicon (c-Si) and thin-film materials, investigations on the energy yield and long-term stability of PV modules and systems are conducted in the Solab module test laboratory. In order to characterise the module stability, results from accelerated ageing tests in the laboratory are correlated with degradation effects under outdoor operating conditions. Newly developed processes for analysing outdoor measurement series also enable the tiniest degradation effects to be detected in the low-light range. The potential-induced degradation (PID) that can be generally observed with all module technologies is investigated using accelerated ageing under high voltage in a climate chamber and at a special test rig for measuring module leakage currents outdoors. In addition to the Widderstall PV Testing Facility, an outdoor test rig in Spain is also available for characterising modules under different climate conditions.

In addition, the experts in the research department are also working on developing testing procedures for flexible solar modules in order to expand the previously existing PV standards. Further working areas include the optimised grid integration of PV systems in combination with electrochemical and thermal storage systems, field tests for PV battery systems and the integration of photovoltaic modules in buildings. The research department's consultancy expertise includes testing planned and existing large-scale PV systems (due diligence) on behalf of banks, project developers and operators. In addition, the research department also offers customer-specific services in the form of site assessments, designs for photovoltaic systems, yield reports and quality checks on photovoltaic systems.

// Contact

Dipl.-Phys. Hans-Dieter Mohring
E-mail: hans-dieter.mohring@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-272

// // Strom eines Tandem-Moduls (blau) und Verhältnis der Ströme von Top- (magenta) bzw. Bottom- (gelb) Komponenten-Modul zu Tandem-Modul im Tagesverlauf.

// Current from a tandem module (blue, right scale) and the ratio between the module current components at the top (magenta) and bottom (yellow) to the tandem module current across the course of a day.

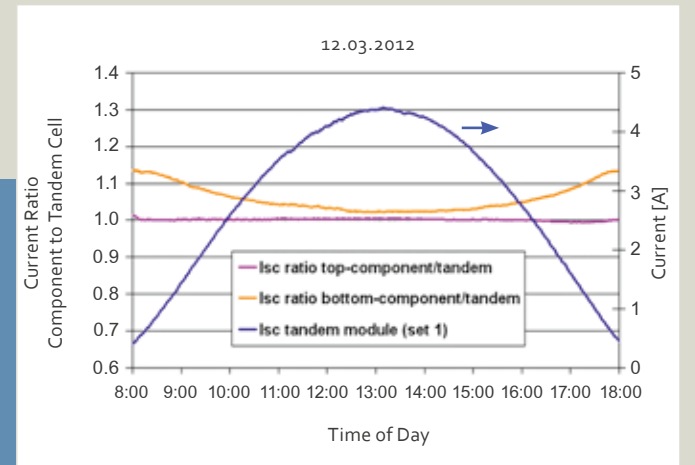
// Charakterisierung von Tandem-PV-Modulen

Characterisation of tandem PV modules

// Charakterisierung von Tandem-PV-Modulen

Mit Hilfe von Tandemzellen lässt sich ein höherer Wirkungsgrad erreichen als mit Einfachzellen. Typische Vertreter sind heute mikromorphe Silizium-Dünnschichtmodule mit einer a-Si/ μ c-Si-Tandemzelle und die – allerdings noch im Laborstadium befindlichen – organischen Tandemzellen (OPV). Der Strom von Tandemzellen reagiert auf das eingestrahlte Sonnenspektrum wesentlich empfindlicher als Einfachzellen. Grund dafür ist die optische und elektrische Serienverschaltung der oberen, der Sonne zugewandten Topzelle sowie der unteren Bottomzelle. Üblicherweise wird die spektrale Empfindlichkeit der Teilzellen so eingerichtet, dass sich deren Ströme bei einer Beleuchtung mit AM1.5-Spektrum entsprechen („Strom-Matching“).

Das im Freifeld durch natürliche spektrale Variation resultierende Verhalten von Strom und Leistung eines Tandemmoduls wurde am ZSW erstmalig mit Hilfe zweier sogenannter Komponentenmodule charakterisiert. Diese repräsentieren mit ihrer spektralen Empfindlichkeit jeweils die Top- und Bottomzelle der Tandemzelle und erlauben die Messung der individuellen Ströme der Teilzellen. Am Freifeld-Teststand Spanien wurden Tandem- und ihre zugehörigen Komponentenmodule einem intensiven Monitoring unterzogen. Die Abbildung oben zeigt den Strom (blau) des Tandemmoduls im Tagesverlauf. Das Verhältnis der Ströme von Top- (magenta) bzw. Bottommodul (gelb) zum Strom des Tandemmoduls liegt zur Mittagszeit, bei einem Sonnenspektrum nahe AM1.5, nahe bei eins, es ist also gutes Strom-Matching gegeben. Morgens und abends, bei rötlichem Licht, wird der Strom des Tandemmoduls begrenzt durch die Topzelle; die Bottomzelle dagegen könnte über 10 % mehr Strom liefern. Mit diesen Informationen können Tandemzellen zukünftig besser spektral angepasst werden, um mit ihnen standortspezifisch einen optimalen Jahresenergieertrag zu erzielen.



// Characterisation of tandem PV modules

With tandem cells, a greater efficiency may be achieved than with single cells. Typical examples are micromorphous silicon thin-film modules with an a-Si/ μ c-Si tandem cell and the organic tandem cells (OPV) albeit at laboratory stage. In terms of the current they produce, tandem modules are substantially more sensitive to the radiated solar spectrum than single cells. This is due to the cells' inherent optical and electrical series connection between the top part-cell facing the sun and the bottom part-cell. Normally, the spectral sensitivity of the part-cells is "current matched" so that their currents accord with the illumination by the AM1.5 spectrum.

Using two so-called component modules, the current and output behaviour of a tandem module caused by the natural spectral variation outdoors were characterised for the first time. With their spectral sensitivity, the two component modules represent the top and bottom cells in the tandem cell and enable individual currents to be measured in the part-cells. Tandem modules and their respective components underwent intensive monitoring at the new outdoor test facility at Girona in Spain. The figure above shows by way of example the current characteristics (blue) for the tandem module during a spring day. The ratio of the currents from the top (magenta) and bottom (yellow) modules to the overall current from the tandem module is at midday, with a solar spectrum close to AM1.5, almost at 1:1, i.e. the current is well matched. In the morning and evening, with reddish light, the current of the tandem module is limited by the top part cell, while the bottom part cell could otherwise yield 10% more electricity. With the help of these data, tandem cells may in the future be better adapted in order to deliver, depending on location, an optimal annual yield.

// Contact

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



”



// Dipl.-Phys. Hans-Dieter Mohring

Der Preisdruck in der Photovoltaik darf nicht zu Einschränkungen der Modulqualität führen. Wir testen Betriebsverhalten und Langzeitstabilität der Module in Labor und Freifeld und minimieren so das Risiko für Hersteller und Anwender.

The cost pressures in the photovoltaic sector must not lead to reductions in the module quality. We test the operating behaviour and long-term stability of modules in the laboratory and outdoors and thus minimise the risk for manufacturers and users.



// Potenzialinduzierte Degradation (PID) von PV-Modulen

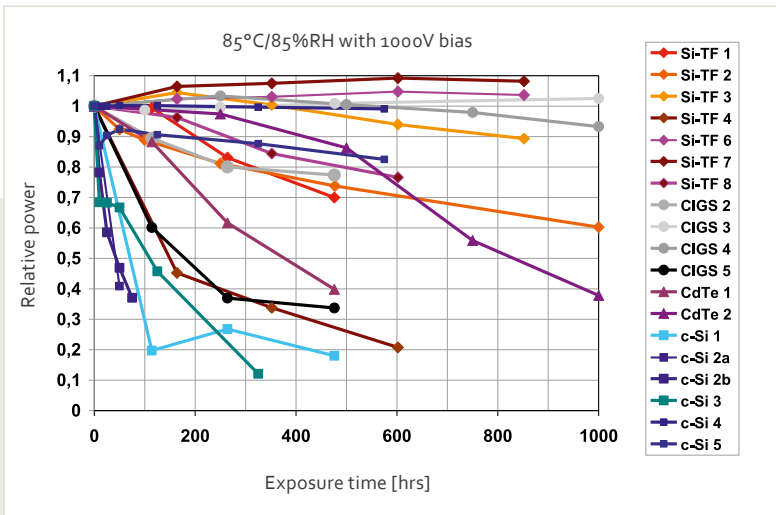
Potential-induced degradation (PID) of PV modules

// Potenzialinduzierte Degradation (PID) von PV-Modulen

Unter PID versteht man eine Leistungsdegradation, die an bestimmten PV-Modulen auftreten kann, wenn über längere Zeit bei feucht-nasser Umgebung ein hohes elektrisches Potenzial am Modul anliegt. Die technische Ursache für PID unterscheidet sich je nach PV-Technologie. Bei Silizium-Dünnschicht- und Kadmium-tellurid-Modulen versteht man darunter eine Korrosion der TCO-Schicht, beim CIGS eine Degradation durch Diffusion von Natrium-Ionen in die CIGS-Schicht und bei c-Si in der Regel eine Polarisierung der Siliziumnitridschicht. Bisher fehlt die Grundlage für eine Korrelation zwischen einer beschleunigten PID-Prüfung im Labor und dem tatsächlichen Freifeldverhalten. Damit ist es heute noch schwierig, eine seriöse Abschätzung eines PID-Risikos für bereits existierende oder neue PV-Anlagen zu geben.

Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projekts „Langzeitstabilität und Leistungscharakterisierung von Dünnschicht-Solarmodulen“ werden Leckströme an Modulen sowohl im Labor als auch auf dem ZSW-Testfeld Widderstall dahingehend untersucht, ob sie als Indikator für die an manchen Modulen beobachtete Degradation der Leistung dienlich sind. Die Abbildung unten zeigt den Leistungsverlauf während eines PID-Tests im Labor für unterschiedlich stabile Module.

Für einige Dünnschicht-Modultypen konnte bereits eine Proportionalität zwischen PID und transferierter Ladung nachgewiesen werden, bei anderen scheint das nicht zu gelten. Bei c-Si-Modulen spielt für das Langzeitverhalten im Feld neben der leckstrombedingten Degradation eine Erholung der Leistung durch thermisches Ausheilen eine wesentliche Rolle.



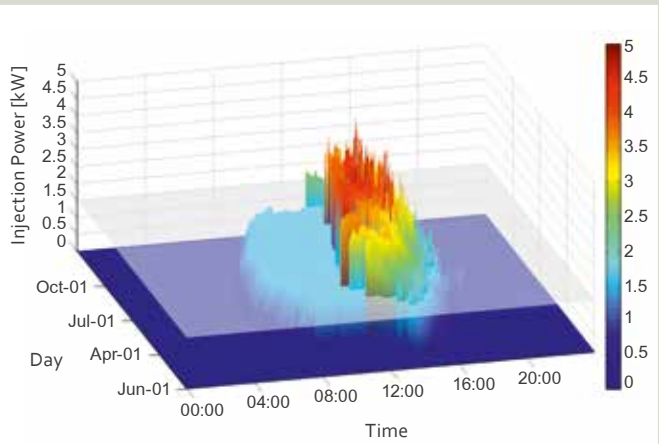
// Leistungsverlauf während eines PID-Tests für unterschiedlich stabile Module.
// Power produced over time during a PID test for modules with varying stability.

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

// Beispiel für starke Kappung auf 25% des Spitzenwerts durch verzögerte Batterieladung; am Nachmittag verbleiben Einspeisespitzen von lediglich 6% der jährlichen PV-Erzeugung. Die Abregelung von 6% an Ertrag erlauben es, die Spitzenbelastung des Netzes um den Faktor 4 zu reduzieren.
// Example for strong capping to 25% of peak power by delayed battery charging; in the afternoon, there remain feed-in peaks of only 6% of annual PV production. Thus, peak load on the grid may be reduced by factor 4, by reducing utilized power generation by only 6%.

// Solarstrom dezentral speichern

Decentralised storage of solar power



// Solarstrom dezentral speichern

PV-Anlagen speisen in Deutschland zu einem großen Anteil ins Niederspannungsnetz ein. Das Maximum in der Mittagszeit erzeugt in Regionen mit hoher Anlagendichte Spannungsüberhöhungen im Verteilnetz. Ein wesentlicher Anteil des häuslichen Stromverbrauchs entsteht dagegen in den Abendstunden zwischen 18 und 22 Uhr. Daher liegt es nahe, den Solarstrom dezentral zwischenspeichern.

Das ZSW untersucht, inwieweit man mit Batterien oder durch die zeitliche Verschiebung großer Lasten, etwa den Betrieb einer Wärmepumpe zur Warm- oder Heizwassererwärmung zeitgleich mit den Erzeugungsspitzen, den Eigenverbrauch des lokal erzeugten Solarstroms erhöhen und gleichzeitig das Netz entlasten kann. So wird mit der in der Abbildung unten gezeigten, verzögerten Batterieladung die Einspeisung ins Netz (blaue Kurve) auf 65 % der an diesem Tag erreichten Spitzenleistung aus Photovoltaik (rote Kurve) begrenzt, ohne Einbuße bei lokalem Nutzen durch Eigenverbrauch zur Deckung der lokalen Last (grüne Kurve). Simulationen beschreiben die Potenziale von PV-Speichersystemen und beleuchten die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen jenseits der Einspeisetarife in Abhängigkeit von Kostenprojektionen für Komponenten sowie von Strompreisen.

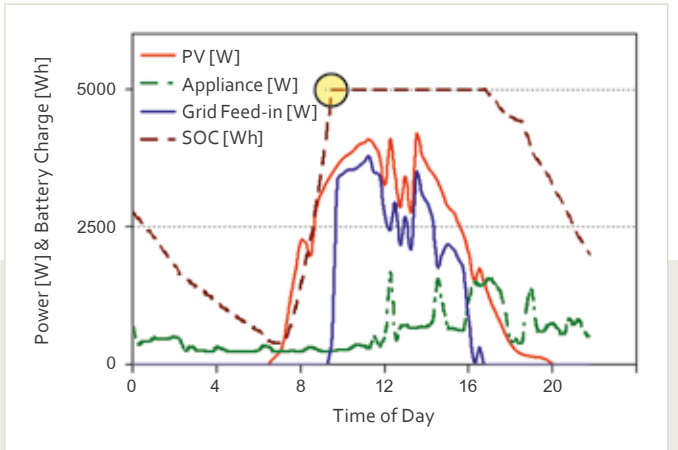
Im Rahmen des deutsch-französischen Forschungsvorhabens „Sol-ion“ ist das ZSW beim praktischen Betrieb und der Auswertung von PV-Speichersystemen sowie bei der Lebensdaueranalyse ihrer Batterietechnik beteiligt.

// Decentralised storage of solar power

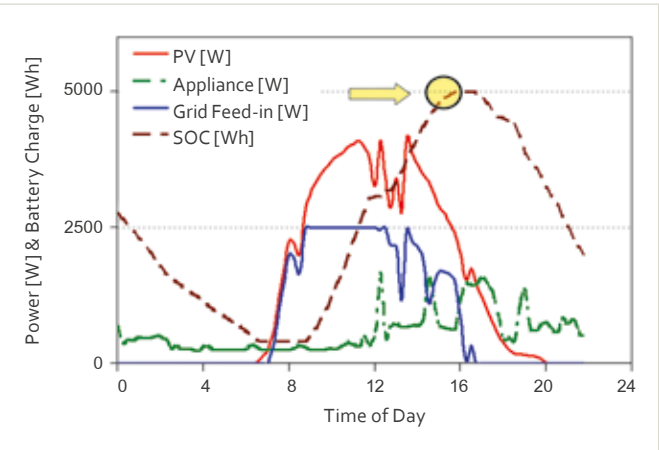
A large proportion of the electricity produced by PV systems in Germany is fed into the low voltage grid. In regions with a high density of systems, the maximum output achieved at midday creates excess voltage in the distribution network. However, a large proportion of domestic electricity consumption occurs during the evening between 6 and 10 pm. It therefore makes sense to temporarily store the solar power decentrally.

By using batteries or chronologically shifting large loads, such as by operating heat pumps for space or domestic hot water heating at the same time as the generation peaks, ZSW is investigating how to increase self-consumption of locally generated solar power and thus relieve the grid at the same time. For example, the delayed battery charging shown in the figure below limits the feed-in into the grid (blue curve) to 65% of the peak output achieved on this day from photovoltaic systems (red curve), without negatively impacting on the benefit gained through self-consumption and covering the local load (green curve). Simulations describe the potential provided by PV storage systems and shed light on the economic feasibility of PV systems beyond feed-in tariffs relative to the cost forecasts for components and electricity prices.

As part of the German-French “Sol-ion” research project, ZSW is involved in the practical operation and evaluation of PV storage systems as well as in the lifecycle analysis of the battery technology involved.



// Tagesprofil: Simulation des PV-Speichersystembetriebs (a) ohne bzw. (b) mit verzögerter Batterieladung.
// Diurnal profile: Simulation of the PV storage system operation (a) without and (b) with delayed battery charging.



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

// Unsere Kernkompetenzen

Die Motivation zur Erzeugung erneuerbarer Brennstoffe ist:

- > Erneuerbare Energie möglichst effizient in einen leicht transportablen, „tankbaren“ chemischen Energieträger zu überführen und zu speichern.
- > Erneuerbare Energieträger über die Erzeugung von Wasserstoff bzw. eines wasserstoffreichen Gases hocheffizient zu verstromen.

Im Fachgebiet REG werden neue Technologien vor allem zur Herstellung von Synthesegas, Wasserstoff und Erdgassubstitut (SNG) entwickelt und im Labor erprobt. Neben der Brennstoffreformierung und der Erzeugung biomassestämmiger Synthesegase durch Vergasung/Pyrolyse sind die Gasreinigung, Gaskonditionierung sowie die Kraftstoffsynthese wichtige Aufgabengebiete. Zielsetzung bei der Gasprozesstechnik ist die Erzeugung eines brennstoffzellentauglichen Gases, eines Brenngases für die Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstoffherzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

REG-Schwerpunktt Themen sind:

- > innovative Speicherkonzepte für regenerativ erzeugten Strom (P2G® „Power-to-Gas“)
- > Elektrolyse
- > thermochemische Konversion biogener Ressourcen
- > Brennstoffreformierung/-konditionierung



// Contact

Dr. Michael Specht
E-mail: michael.specht@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-218

// Our main focus

Our goals in the production of renewable fuels can be summarised as follows:

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

REG develops and tests new technologies, especially for the production of synthesis gas, hydrogen and substitute natural gas (SNG). Our activities are focused around fuel reforming, the production of synthesis gases from biomass using gasification/pyrolysis, gas cleaning and conditioning, and fuel synthesis. The gas processing objectives are to produce a suitable gas for fuel cells, a biogenic fuel gas for electricity generation or a conditioned synthesis gas for fuel production and the gas processing required for the natural gas grid.

REG focuses on:

- > innovative energy storage concepts for renewable electricity (P2G® “Power-to-Gas”)
- > electrolysis
- > thermochemical conversion of biogenic resources
- > fuel reforming/fuel conditioning

// AER-Biomassevergasung

AER biomass gasification

// Zweibett-Wirbelschichtreaktor zur Charakterisierung von Wirbelschicht-Bettmaterialien

Unter den erneuerbaren Energien ist die Biomasse die einzige kohlenstoffhaltige Quelle. Daher ist Biomasse für die Bereitstellung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern für Mobilitätsanwendungen, die Energiespeicherung und die stoffliche Nutzung prädestiniert. Mit der absorptionsunterstützten Wasserdampf- reformierung (AER-Verfahren; Absorption Enhanced Reforming) können biogene Reststoffe effizient in ein wasserstoffreiches Produktgas (H_2 -Gehalt > 60 Vol.%) umgewandelt werden. Das AER-Produktgas eignet sich aufgrund seiner Zusammensetzung für die Erzeugung von regenerativen kohlenstoffhaltigen Energieträgern wie Erdgassubstitut (SNG). Im AER-Prozess fungieren Kalksteinpartikel als natürliches Wirbelschicht-Bettmaterial, das zwischen Vergasungs- und Verbrennungsreaktor zirkuliert. Das Bettmaterial transportiert Wärme aus der Verbrennungs- in die Vergasungszone, gebrannter Kalk bindet das in der Vergasungszone entstehende CO_2 in situ ein und wirkt katalytisch auf die Vergasungsreaktionen. Somit ist ein reaktives, stabiles Bettmaterial von zentraler Bedeutung für einen effizienten und sicheren Vergasungsbetrieb.

Um die technische Umsetzung des AER-Verfahrens in den kommerziellen Maßstab voranzutreiben, werden in dem neuen Zweibett-Wirbelschichtreaktor grundlegende Aspekte und Bettmaterial-eigenschaften unter prozess typischen Reaktionsbedingungen untersucht. Wichtige Zielgrößen sind dabei die mechanische Stabilität des Bettmaterials, die Materialalterung, das CO_2 -Sorptionsverhalten und die katalytische Aktivität (Wassergas-Shift-Reaktion). Hierbei werden Temperaturen, Gaszusammensetzungen, die Bettmaterialmasse und Feststoffzirkulation realitätsnah gewählt. Eine umfangreiche Messtechnik sowie Vor- und Nachanalysen des Bettmaterials dienen der Prozessanalyse.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an dem Zweibett-Wirbelschichtreaktor werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziell gefördert (Förderkennzeichen 03SF0348A).



// CAD-Konstruktion und Foto des Zweibett-Wirbelschichtreaktors.
// CAD illustration and photo of the fluidised twin-bed reactor.

// Contact

Dipl.-Ing. Jochen Brellochs
E-mail: jochen.brellochs@zsw-bw.de
Phone: +49(0)711 78 70-211

// Fluidised twin-bed reactor for characterising fluidised bed materials

Among renewable energies, biomass is the only carbon-based source. Therefore, biomass is predestined for providing carbon-based fuels for mobility uses, energy storage and material utilisation. Using the absorption-enhanced reforming (AER) process, biogenic residues can be efficiently transformed into a hydrogen-rich product gas (H_2 content > 60 vol.%). Its composition makes the AER product gas suitable for generating renewable carbon-based fuels such as substitute natural gas (SNG). In the AER process, limestone particles act as natural fluidised bed material that circulates between the gasification and combustion reactor. The bed material transports heat from the combustion zone into the gasification zone, whereby burnt limestone binds the CO_2 created in the gasification zone in situ and has a catalytic effect on the gasification reactions. A reactive, stable bed material is therefore centrally important for an efficient and secure gasification operation.

In order to drive forward the technical implementation of the AER process at a commercial scale, fundamental aspects and bed material properties are being investigated in the new fluidised twin-bed reactor under reaction conditions typical for the process. Important target values include the mechanical stability of the bed material, the material ageing, the CO_2 sorption behaviour and the catalytic activity (water gas shift reaction), whereby the temperature, gas composition, bed material mass and the solid material circulation are chosen to be as close as possible to reality. The process analysis is based on the use of comprehensive measurement technology and pre- and post-analyses of the bed material.

The research and development work on the fluidised twin-bed reactor is being funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (Funding Code 03SF0348A).

// Power-to-Gas (P2G®)

Power-to-Gas (P2G®)

// Power-to-Gas (P2G®)

Ziel eines künftigen Energiesystems ist eine nachhaltige Vollversorgung aus erneuerbaren Ressourcen. Windkraft oder Photovoltaik fallen jedoch stark fluktuierend an. Trotzdem sollen Strom, Wärme und Kraftstoff auch weiterhin jederzeit zur Verfügung stehen, woraus sich die Notwendigkeit zur Energiespeicherung ergibt.

Die derzeit durch Pumpspeicherkraftwerke vorhandene Speicherkapazität in Deutschland beträgt 0,04 TWh. Abschätzungen des zukünftigen Speicherbedarfs bei einer zu 100 % erneuerbaren Stromversorgung liegen im zweistelligen TWh-Bereich. Das maßgeblich am ZSW unter Beteiligung des Fraunhofer IWES und eines privaten Unternehmens entwickelte P2G® (Power-to-Gas)-Konzept sieht vor, „überschüssigen“ Strom mittels Elektrolyse zu Wasserstoff und in einer anschließenden Synthesestufe mit CO₂ zu Methan umzusetzen (Methanisierung). Als CO₂-Quelle kommen z. B. Biogasanlagen, Anlagen zur Bioethanolherstellung, Kraftwerksprozesse und die chemische Industrie infrage. Durch die Umwandlung von Strom zu Gas können zur Speicherung die im Erdgasnetz vorhandenen Unterspeicher mit einer Kapazität von > 200 TWh mitgenutzt werden. Im Fachgebiet REG erfolgt das Basic Engineering für P2G®-Anlagen und die Anpassung an spezifische Anforderungsprofile. Im Jahr 2011 begann der Betrieb einer containerintegrierten Anlage an Standorten mit verschiedenen CO₂-Quellen. Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes „Power-to-Gas“ (0325275A) ist Ende 2012 eine weitere, um den Faktor zehn größere Versuchsanlage mit 250 kW_{el} am ZSW in Betrieb gegangen.

// Power-to-Gas (P2G®)

The aim of future energy systems is to provide comprehensive and sustainable energy provision from renewable sources. However, wind energy and photovoltaic power are highly fluctuating. This means that energy will need to be stored if electricity, heat and fuel are to remain available at all times. The storage capacity provided by pumped storage plants in Germany currently amounts to 0.04 TWh. It is estimated that the future storage requirement, given 100% electricity provision with renewable energy, would lie in the double-digit TWh range. The P2G® (Power-to-Gas) concept, which has been largely developed at ZSW together with Fraunhofer IWES and a private company, plans to convert “excess” electricity into hydrogen by means of electrolysis and then convert the hydrogen into methane in a subsequent synthesis step (methanisation), by combining it with CO₂. Possible sources of CO₂ include biogas plants, bioethanol production plants, power plant processes and the chemical industry. Converting electricity into gas will enable the existing underground storage systems in the natural gas network, which have a capacity > 200 TWh, to be used. The basic engineering for the P2G® plants and their adaptation to specific requirement profiles have been conducted within the REG research department. In 2011, container-integrated systems went into operation at various sites with different types of CO₂ sources. As part of the “Power-to-Gas” project (0325275A) funded by the German Federal Ministry of the Environment, a further test plant at ZSW commenced operation at the end of 2012. This is ten times larger and has a capacity of 250 kW_{el}.

// Blick auf das zentrale Elektrolysesystem mit den Elektrolyseblöcken zur Wasserstoff- und Sauerstofferzeugung.
// View of the central electrolyser system with the electrolyser units for hydrogen and oxygen generation.

P2G®-Einweihung

Mit der Fertigstellung der 250-kW-Forschungsanlage wurde eine weitere Hürde auf dem Weg zur Marktfähigkeit der P2G®-Technologie überwunden: Am 30. Oktober 2012 hat das ZSW seine neue Anlage eingeweiht. Mit einer möglichen Methanproduktion von bis zu 300 m³ pro Tag ist sie die größte Anlage ihrer Art weltweit. Ziel des Versuchsbetriebs ist die Prozessoptimierung hinsichtlich der erzielbaren Gasqualität, reduzierter Gasqualität und Kosten. Die 250-kW-Anlage besteht aus einem alkalischen Druckelektrolyseur, einer Methanisierungseinheit sowie dem Prozessleitsystem für die Steuerung und Regelung. Die Forschungsanlage arbeitet dynamisch und intermittierend. Im Gegensatz zur ersten Anlage kann sie flexibel auf das rasch wechselnde Stromangebot aus Wind und Sonne und auf plötzliche Unterbrechungen reagieren. Die Steuerungs- und Regelungstechnik entspricht der Technik künftiger industrieller Großanlagen. Dr. Urban Rid, Ministerialdirektor am Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, lobte während der Einweihung den technologischen Fortschritt. „Die Power-to-Gas-Forschungsanlage am ZSW ist ein Meilenstein für die weitere Hochskalierung und Kostensenkung der Technologie und somit ein wichtiger Schritt, um Power-to-Gas mittel- bis langfristig industriell nutzbar zu machen. Die Umwandlung von Strom in Wasserstoff oder Methan bietet die Möglichkeit überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien langfristig zu speichern, diesen im Bedarfsfall wieder in Strom umzuwandeln oder im Wärme- oder Verkehrssektor einzusetzen.“ Der nächste Schritt zur Kommerzialisierung der P2G®-Technologie folgt 2013 im niedersächsischen Werlte. Das Partnerunternehmen errichtet dort im Auftrag eines Automobilherstellers eine 6-MW-Anlage. Die Erfahrungen aus der ZSW-Forschungsanlage werden auch in das „e-gas-Projekt“ des Automobilherstellers einfließen.

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der Anlage werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanziell gefördert (Förderkennzeichen 0325275A-C).

P2G® inauguration

A further hurdle on route to achieving the marketability of P2G® technology has been overcome with the completion of the 250-kW research plant: ZSW inaugurated its new plant on 30 October 2012. With a potential methane production of up to 300 cm³ per day, it is the largest plant of its kind worldwide. The aim of the test operation is to optimise the process in terms of the achievable gas quality, reduced gas quality and costs. The 250-kW plant comprises an alkaline pressure electrolyser, a methanisation unit and a process control system for regulating the plant. The research plant works dynamically and intermittently. In contrast to the first plant, it can respond flexibly to fluctuating energy supplies from the wind and sun and can also respond to sudden interruptions. The control and regulation technology corresponds to the technology used by future large-scale industrial plants. At the inauguration, Dr. Urban Rid, Director General at the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Reactor Safety (BMU), praised the technological progress that has been made: “The Power-to-Gas research plant at ZSW is a milestone in further scaling up the technology and reducing its costs, and thus an important step in making Power-to-Gas usable on an industrial scale in the medium to long term. The conversion of electricity into hydrogen or methane enables surplus electricity from renewable energies to be stored on a long-term scale, converted back into electricity as required or deployed in the heating and transport sectors.” In 2013, the next step in commercialising the P2G® technology will take place in Werlte in Lower Saxony. There the partner company is constructing a 6-MW plant on behalf of an automotive company. The experience gained from ZSW’s research plant will also be utilised in the automotive company’s “e-gas” project.

The research and development work on the plant is being funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Reactor Safety (BMU) (Funding Code 0325275A-C).

// Gut 100 Gäste besuchten die Einweihung der Forschungsanlage.
// Well over 100 guests were present at the inauguration of the P2G® plant.

// Contact

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Neue Aktivmaterialien

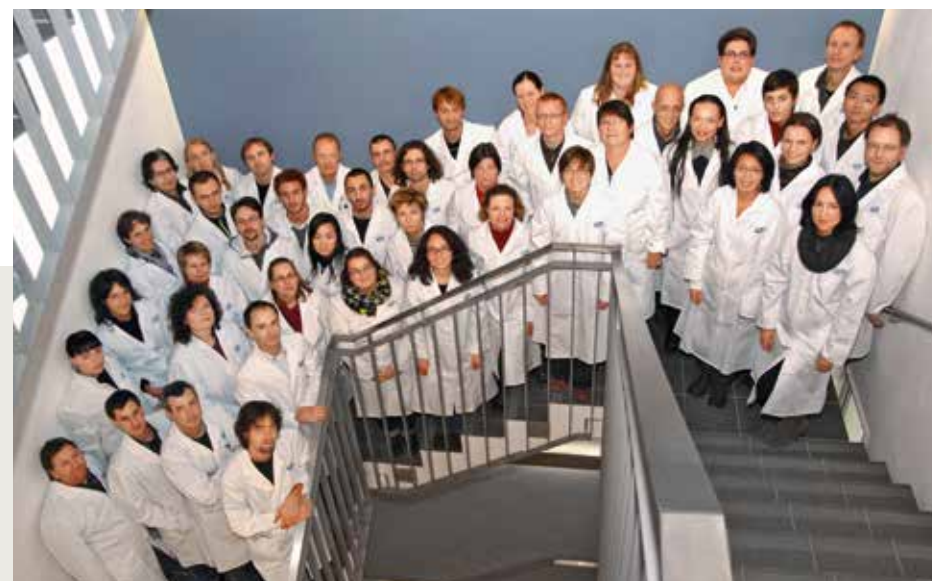
Der traditionelle Schwerpunkt unserer Arbeiten liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren mit der Kernkompetenz in der Entwicklung maßgeschneiderter Pulver. Rund 25 Jahre Materialforschung bilden die Basis für unser Verständnis der Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie hinsichtlich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben den klassischen Schichtoxiden für die Kathoden und kohlenstoffbasierten Anoden wird intensiv an Lithiumübergangsmetallphosphaten, Titanaten, Legierungsanoden, neuen Elektrolytsystemen und speziellen Additiven geforscht.

Zellfertigungstechnologien

Seit Inbetriebnahme einer Pilotfertigungslinie für Lithium-Ionen-Zellen im ZSW eLaB werden seit 2010 Zellen im Format 18650 und 2-Ah-Pouchzellen für Forschungszwecke hergestellt. Mit der Anlage können angepasste vorindustrielle Prozessentwicklungen für neuartige, leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Zellgenerationen generiert werden. Erste im eLaB gefertigte Zellen mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine hohe Reproduzierbarkeit und hervorragende Zyklenstabilität.

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, potenziellen Systemschwachstellen und für die Materialoptimierung.



// Contact

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

// Lithium-Ionen-Vollzellen: Projekt Linacore

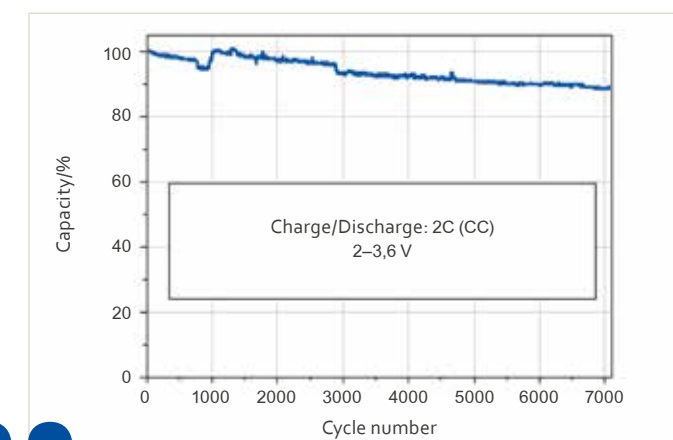
Cell technology for lithium-ion batteries

// Hohe Zyklenlebensdauer von Lithium-Ionen-Zellen mit selbst gefertigten Elektroden

Der Name Linacore steht für „Hochleistungslithiumbatterien mit Nanopartikeln in Core-Shell-Technologie“. Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie hat ein Konsortium aus sieben führenden Industrieunternehmen und fünf Forschungsinstituten in Deutschland eine Wertschöpfungskette für Lithium-Ionen-Technologie von der Materialherstellung bis zur Systemintegration in der Anwenderindustrie aufgebaut.

Das ZSW hat als Technologie-Provider einen Herstellungsprozess für Elektroden und Zellen entwickelt und verschiedene Aktivmaterialgenerationen zu Vollzellen im Format 18650 verarbeitet.

In diesem Rahmen wurde eine Methode zur exakten Einstellung der Flächenbelegung beim Elektrodenbeschichtungsprozess entwickelt. Hiermit wurden aus vier Generationen verschiedener chemischer Materialien Elektroden entwickelt. Durch eine Balancierungsmethode unter Einsatz von Lithium-Referenzelektroden konnten Vollzellen mit aufeinander abgestimmten Elektroden hergestellt werden. Die Zellen mit den untersuchten Materialkombinationen zeigen sehr hohe Lebensdauern von bereits mehreren tausend Zyklen bei hoher Energiedichte.



// High cycle life of lithium-ion cells with self-produced electrodes

The name Linacore stands for "high-performance lithium batteries with nanoparticles in core shell technology". Funded by the German Ministry of Economics and Technology (BMWi), a consortium of seven leading industrial companies and five research institutes in Germany have developed a value chain for lithium-ion technology that ranges from the material production to the system integration in the user industry.

As a technology provider, ZSW has developed a manufacturing process for electrodes and cells and processed various active material generations to form full cells in the 18650 format.

As part of this work, a method for precisely setting the surface composition in the electrode coating process has been developed. Electrodes have therefore been developed from four generations of different chemical materials. The use of a balancing method that deploys lithium reference electrodes has enabled us to produce full cells with inter-matched electrodes. The cells with the investigated material combinations display very long lifecycles that already achieve several thousand cycles with a high energy density.

// Relativer Kapazitätsverlauf einer Rundzelle (18650) aus Lithiumeisenphosphat/amorphem Kohlenstoff bei galvanostatischer Zyklierung. Kapazitätserhalt nach 7500 Zyklen > 88 %.
// Relative capacitance drift of a round cell (18650) from lithium iron phosphate/amorphous carbon during galvanostatic cyclisation. Capacitance after 7500 cycles > 88%.

// Contact

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

„



// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens

Zukünftige Mobilität und erneuerbare Energien erfordern neue Energiespeichersysteme. Wir bilden die komplette Wertschöpfungskette vom Pulver bis zur fertigen Zelle ab und können hierdurch einen entscheidenden Beitrag leisten.

Future mobility and renewable energies require new energy storage systems. We provide the complete value chain from the powder to the finished cell and can thus make a decisive contribution.

// Neue Elektrolyte für Lithium-Ionen-Batterien

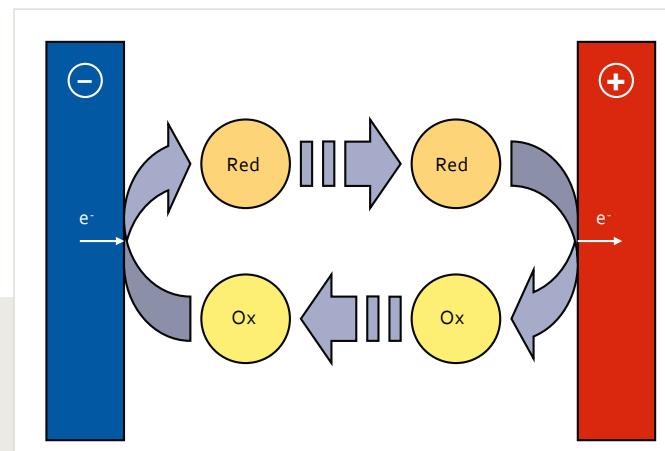
New electrolytes for lithium-ion batteries

// Li-Redox

Die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien lässt sich durch die Auswahl geeigneter Elektrolytformulierungen entscheidend verbessern. Im Jahr 2012 konnte das Projekt Li-Redox (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) erfolgreich abgeschlossen werden. Gemeinsam mit zwei namhaften Industriepartnern widmete sich das ZSW darin der Entwicklung von Redox-Shuttle-Elektrolytadditiven (RSA). RSA ermöglichen einen reversiblen Schutz vor Überladung, indem der Überladestrom durch Einsetzen eines internen Redox-Kreislaufs konsumiert wird (Abb. unten links). Die Zelle bleibt dabei auch nach Aktivierung des Überladeschutzmechanismus einsatzfähig.

Im Projekt wurde ein kombinierter theoretischer und experimenteller Ansatz verfolgt. Zuerst erfolgte ein Vorab-Screening einer großen Anzahl möglicher RSA-Kandidaten über Ab-initio-Berechnungen. Die vielversprechendsten Kandidaten wurden dann im Detail experimentell charakterisiert und auf ihre Wirksamkeit geprüft.

Im Rahmen der Arbeiten wurden zwei neue Substanzklassen mit mehreren möglichen Vertretern für den Einsatz von 3 bis 5 V vs. Li/Li⁺ identifiziert (Abb. unten rechts). Darüber hinaus konnten neue analytische Methoden eingeführt und ein tieferes Verständnis für die Wirkungsweise von RSA erarbeitet werden.



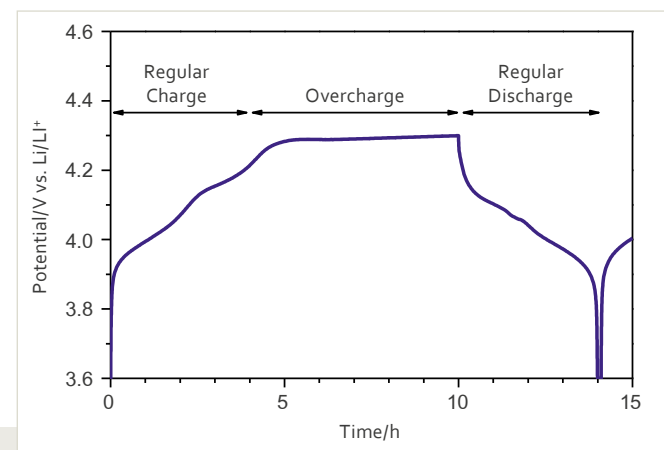
// Wirkungsweise eines Redox-Shuttle-Additivs unter Überladebedingungen.
// Working mechanism of a Redox shuttle additive works under overcharging conditions.

// Li-Redox

The safety of lithium-ion batteries can be decisively improved through the choice of suitable electrolyte formulations. The Li-Redox project, which was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), was successfully concluded in 2012. Together with two renowned industrial partners, ZSW's work in the project was focussed on developing redox shuttle electrolyte additives (RSAs). RSAs enable reversible protection against overcharging by deploying an internal redox circuit to consume the overcharge current (fig. below left), whereby the cell can still be used once the overcharging protection mechanism has been activated.

A combined theoretical and experimental approach was adopted for the project. A large number of potential RSA candidates were first of all screened in advance using ab-initio calculations. The most promising candidates were then experimentally characterised in detail and tested in terms of their effectiveness.

As part of the work, two new substance classes with several possible representatives were identified for use from 3 to 5 V vs. Li/Li⁺ (see fig. below right). In addition, ZSW was able to introduce new analytical methods and gain a greater understanding about the way RSAs work.



// Galvanostatischer Überladetest einer LiMn₂O₄-Halbzelle mit neuem Redox-Shuttle-Additiv, das bei 4,3 V vs. Li/Li⁺ arbeitet.
// Galvanostatic overcharging test for a LiMn₂O₄ half-cell with a new redox shuttle additive that works at 4.3 V vs. Li/Li⁺.

// Contact

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

// Nachwuchsforschergruppe NOVACAP

Young investigator group NOVACAP

// Neue Elektroden-Designkonzepte für Batterie-Superkondensator-Hybride

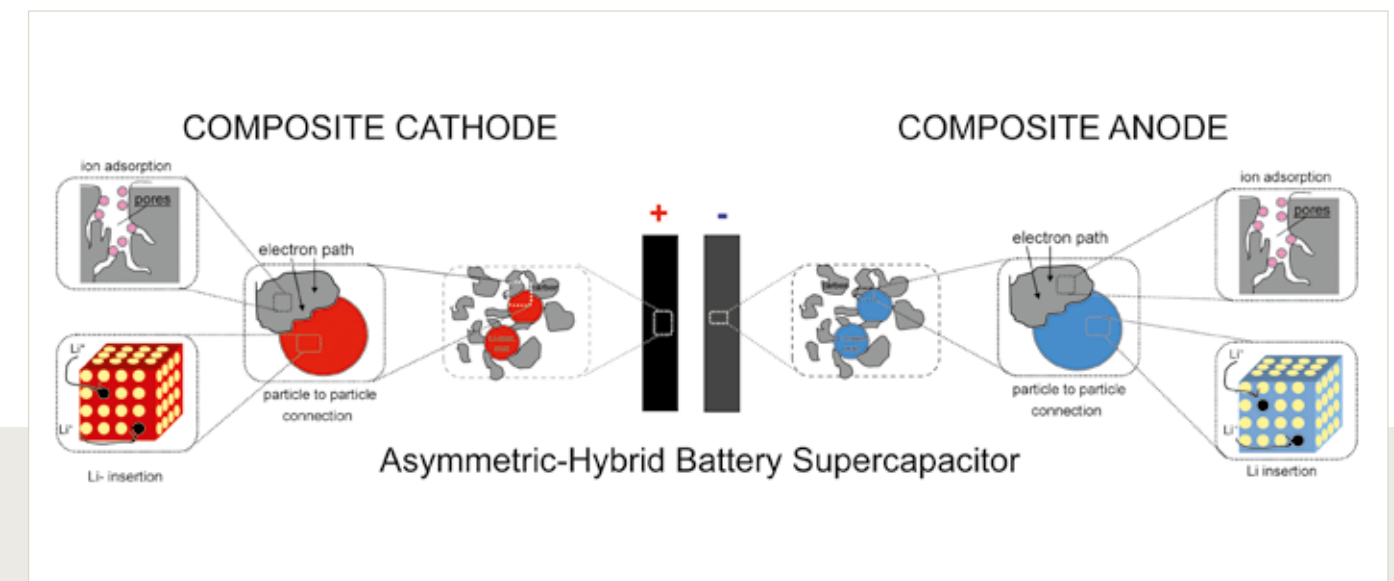
Seit Sommer 2012 arbeitet eine neue Nachwuchsforschergruppe an neuen Designkonzepten für Superkondensatoren bzw. Hybridkondensatoren. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Identifizierung und Erforschung neuer Hochleistungsmaterialien für asymmetrische Hochenergiesuperkondensatoren. Mit Hilfe nanostrukturierter Kompositmaterialien aus hochporösen Kohlenstoffmaterialien und Lithiuminsertionsmaterialien sollen Superkondensatorelektroden mit hohem Energieinhalt bei gleichzeitiger Hochleistung und exzellenter Lebensdauer entwickelt werden.

Die Forschergruppe verfolgt einen ergebnisorientierten, integrierten Ansatz von der Synthese und Charakterisierung neuer nanostrukturierter Kompositmaterialien über die Entwicklung eines optimierten Designs für die Elektrodenmikrostruktur bis hin zur Erarbeitung neuer Herstellprozesse für die Elektrodenpräparation und die Evaluierung dieser Konzepte in hybriden Batterie-Superkondensatoren. Schwerpunkt der Untersuchungen ist dabei neben der Entwicklung neuer Syntheserouten für Kompositmaterialien die Erarbeitung eines fundierten Verständnisses der Funktions-Eigenschafts-Beziehungen vom Pulver bis zum fertigen Energiespeicher.

// New electrode design concepts for hybrid battery supercapacitors (NOVACAP)

Since summer 2012, a new young investigator group has been working on new design concepts for supercapacitors and hybrid capacitors. The aim of the research project is to identify and research new high-performance materials for asymmetric high-energy supercapacitors. With the help of nano-structured composite materials from highly porous carbon materials and lithium insertion materials, the aim is to develop supercapacitor electrodes that have a high energy content along with a high performance and excellent service life.

The research group is adopting a results-based, integrated approach ranging from the synthesis and characterisation of new nanostructured composite materials and the development of an optimised design for the electrode microstructure to the development of new production processes for preparing the electrodes and the evaluation of these concepts in hybrid battery supercapacitors. In addition to developing new synthesis routes for composite materials, the investigations will also focus on developing a thorough understanding of the relationships between the functions and properties, ranging from the powder to the final energy storage system.



// Neue Elektroden-Designkonzepte für Batterie-Superkondensator-Hybride.
// New electrode design concepts for hybrid battery supercapacitors.

// Contact

Dr. Sonia Dsoke
E-mail: sonia.dsoke@zsw-bw.de
Phone: +49(0)731 95 30-560



// Ausblick eLaB 2014 Produktionsforschung Lithium-Ionen-Zellen

A view on eLaB 2014 : Lithium-ion cells production research

Leistungsfähige Batterien sind ein zentrales Element für die in Deutschland aufzubauende Kompetenz „Leitanbieter Elektromobilität“ und für die Energiewende. Grundvoraussetzung laut Beschluss der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) ist der Aufbau produktionstechnischen Know-hows für die vollautomatisierte Serienfertigung von Zellen höchster Qualität. Die in den Batterien verbauten elektrochemischen Zellen sind das entscheidende Element am Gesamtsystem und haben einen signifikanten Wertschöpfungsanteil.

// Forschungsproduktionslinie für Fahrzeugbatterien

Mit dem 2011 in Ulm eröffneten ZSW-Labor für Batterietechnologie (eLaB) ist ein wichtiger Schritt für den Kompetenzaufbau zu Zellen- und Herstellertechnologien gelungen. Im eLaB wurden 18650- und kleine 2-Ah-Pouchzellen mit einem Qualitäts- und Leistungsniveau kommerzieller Zellen hergestellt. 18650-Zellen findet man in mobilen Geräten wie Laptops oder Mobiltelefonen. Die Validierung einer neuen Zellchemie in Standardzellen konnte erfolgreich an mehreren Beispielen aufgezeigt werden.

Mit der geplanten neuen Anlage, der sogenannten Forschungsproduktionslinie, wird in Deutschland nun die letzte Lücke im vorwettbewerblichen Umfeld geschlossen: Die Anlage wird installiert, um seriennahe Fertigungsprozesse von großen prismatischen Zellen mit einer Kapazität von mehr als 20 Ah und Außenmaßen nach DIN-Standards, beispielsweise für Elektroautos, zu erforschen und weiterzuentwickeln. Die Anlage wird so ausgelegt, dass mit ihr mindestens 300 Zellen pro Tag mit reproduzierbarer, hoher Qualität gefertigt werden können.

// Prozessentwicklung und Produktionstechnik für große Lithium-Ionen-Zellen

Die serienmäßige Produktion großer Zellen stellt besonders hohe Anforderungen an Prozessgeschwindigkeiten und Fertigungstoleranzen. Je höher die Qualität und die Reproduzierbarkeit der hergestellten Zellen ist, desto zuverlässiger, langlebiger und kostengünstiger wird der Speicher für ein Elektrofahrzeug. Bisher gibt es in Deutschland nur begrenzt detaillierte Kenntnisse über die Qualitätsanforderungen an die einzelnen Prozessabschnitte, über Fertigungstoleranzen, die erforderliche Inline-Sensorik für die Qualitätssicherung oder die Anlagenanforderungen für große Lithium-Ionen-Zellen. Es besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf und damit die Chance für die Etablierung neuer Konzepte auch für den Anlagenbau.

// Entwicklungsplattform für Partner aus Industrie und Forschung

Mit der neuen Forschungsproduktionslinie eröffnen sich breite Möglichkeiten, um unabhängig produktionstechnologische Untersuchungen in einem seriennahen Herstellungsprozess durchzuführen. Mit der Anlage können neue Materialien und Komponenten in Hinblick auf die Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Umfeld evaluiert werden. Es entsteht eine vorwettbewerbliche Entwicklungsplattform, die den seriennahen Gesamtproduktionsprozess abbildet. Durch den modularen Aufbau können Unternehmen und auch Forschungsorganisationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette neue leistungsstärkere Verfahren und Anlagenkomponenten in einer prozesssicheren Testumgebung erproben, ohne in eine kommerzielle Zellproduktion eingreifen zu müssen. Besonders mittelständischen Unternehmen bieten sich Möglichkeiten, innovative Konzepte für Komponenten, Prozesse und Qualitätssicherungsmaßnahmen zu erproben.

// Starke Partner

Um die deutschlandweit einmalige Anlage aufzustellen, wird das eLaB in Ulm um einen vierten Gebädetrakt erweitert. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert die Anlagenausrüstung mit einem Volumen von 23,5 Mio. Euro in der ersten Phase. Die Gebäudeerweiterung erfolgt mit Unterstützung des Landes Baden-Württemberg in Höhe von 6 Mio. Euro. Führende deutsche Industrieunternehmen des Industrieverbundes Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (KLiB) unterstützen die Aktivitäten und sehen in der Technologieplattform einen entscheidenden Faktor für den Aufbau einer starken deutschen Zell- und Batterieindustrie. Die Anlage soll 2014 in Betrieb genommen werden.



// Basistechnologie für den „Leitanbieter Elektromobilität“. ZSW-CAD-Konstruktion prismatische Wickelzelle nach VDA-Kriterien (PHEV-1-Design nach VDA).
// Enabling technology for Germany as the leading electromobility provider. ZSW CAD construction of a prismatic coil cell according to VDA criteria (PHEV 1 design according to VDA).

// Infobox

Modulare Forschungsproduktionslinie „Vom Material bis zur Zelle für die seriennahe Fertigung großer Lithium-Ionen-zellen (≥ 20 Ah) im prismatischen Standarddesign“.

- > Mischanlagen zur Pastenherstellung für 60-l-Ansätze, thermostatisierbar, automatisches Abwiegen und Zuführen von verschiedenen Materialien, räumliche Trennung von Anoden- und Kathodenansätzen.
- > Beidseitige modulare Elektrodenbeschichtung mit 500 mm Beschichtungsbreite, 20 m/min Bandgeschwindigkeit mit verschiedenen Auftragssystemen und Präzisionskalender.
- > Vollautomatische Verknüpfung der Prozessschritte Wickeln, Montage und Befüllung von prismatischen Zellen mit einer Taktzeit von mindestens 1 Zelle/min.
- > 200 m² Trockenraum (Taupunkt -60 °C) für die Erprobung neuer Assemblierungstechnologien.
- > Vollautomatische Formation mit 900 temperierbaren Zyklisierplätzen und 2.000 Lagerplätzen.

Modular research “Production line ranging from the material to the cell for the near-series production of large lithium-ion cells (≥ 20 Ah) in a prismatic standard design”.

- > Mixing stations for slurry preparation, 60-l batches, thermostatically controlled, automatic weighing and loading for a variety of materials and locally separated anode and cathode batches.
- > Module electrode coating on both sides, 500 mm coating width, 20 m/min production speed and various apply systems and a precision calender.
- > Full automatic linked processes winding, assembly and filling of prismatic cells with cycle times of at least 1 cell per minute.
- > 200 square metres drying room (dew point – 60 °C) for testing new assembly technologies.
- > Full automatic formation with 900 tempered cycle stations and 2,000 storage stations.

// Contact

Prof. Dr. Werner Tillmetz
E-mail: werner.tillmetz@zsw-bw.de
Phone: +49 (0)731 95 30-607

Powerful batteries provide a central element in developing Germany's expertise as the leading electromobility provider and for the energy transition. According to a resolution made by Germany's National Electromobility Platform (NPE), a fundamental prerequisite is the development of production-based expertise for the fully automatic series production of cells of maximum quality. The electrochemical cells integrated in the batteries are the decisive element in the overall system and have a significant value-added component.

// Research production line for vehicle batteries

An important step in developing expertise in cell and manufacturing technologies was achieved in 2011 with the opening of the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB) in Ulm. Since then, the eLaB has been used for producing 18650 cells and small 2-Ah pouch cells with a quality and output level equivalent to commercial cells. 18650 cells can be found in mobile devices such as laptops and mobile phones. New cell chemistry in standard cells has been successfully validated in several examples.

The last gap in the pre-competitive environment is now being closed in Germany with the planned new installation, the so-called research production line. This plant is being installed to research and develop near-series production processes for large prismatic cells with capacities greater than 20 Ah and external dimensions according to DIN standards, for example for electric cars. The plant is designed to be able to produce at least 300 cells per day with a reproducible high quality.



// Process development and production technology for large lithium-ion cells

The series production of large cells presents considerable demands in terms of the process speeds and production tolerances: the greater the quality and reproducibility of the manufactured cells, the greater the reliability, durability and cost-effectiveness of the storage systems used in electric vehicles. Until now, only a limited degree of detailed knowledge has existed in Germany about the quality requirements for the individual process stages, production tolerances, required inline sensors for quality assurance and plant requirements for large lithium-ion cells. There is still a considerable need for research and development – thus providing the opportunity to establish new concepts in plant engineering.

// Development platform for partners in industry and research

The new research production line provides wide-ranging possibilities for conducting independent production and technological studies in a near-series manufacturing process. The plant enables new materials and components to be evaluated in terms of their processability and quality in an industrially relevant environment. This creates a pre-competitive development platform that models the entire near-series production process. The modular structure enables companies (and also research organisations) to test new and powerful processes and system components in a reliable test environment along the entire value chain without having to engage in commercial cell production. In particular, this gives medium-sized companies the opportunity to test innovative concepts for components, processes and quality assurance measures.

// Strong partners

In order to set up the plant, which is unique in Germany, the eLaB in Ulm is being expanded with a fourth building wing. The German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) is spending €23.5 million to fund the plant equipment during the first phase. The Federal State of Baden-Württemberg is providing €6 million to help fund the building extension. Leading German industrial companies in the Lithium-Ion Batteries Competence Network (KLiB) are supporting the activities and view the technology platform as a decisive factor in developing a strong German cell and battery industry. The plant is scheduled to enter operation in 2014.

// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Unsere Hauptaufgabe ist die Untersuchung und Weiterentwicklung von Energiespeichersystemen. Damit Akkumulatoren bzw. Batterien auch bei schwierigsten Bedingungen sicher und leistungsfähig sind, stehen deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die Ermittlung der qualitativen Eigenschaften sowie die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung oder in Unfallsituationen im Mittelpunkt unserer Arbeiten.

Abuse Tests

Mittels „Abuse Tests“ können wir die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie die Widerstandsfähigkeit der Akkumulatoren gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilen.

Batteriesystemtechnik

Zu unseren zentralen Aufgaben im Bereich der Batteriesystemtechnik gehören die Bestimmungsmöglichkeiten des Systemzustandes (Ladezustand, Alterung), die Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit, die thermische und elektrische Modellierung sowie die Simulation von Batterien und Batteriekomponenten. Dazu beherrschen wir eine breite Palette unterschiedlicher Tests und Simulationen. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung und Optimierung bestimmter Akkumulatoren und ihrer Betriebsweisen für verschiedene Anwendungen ein. Dazu zählen der Einsatz zur Netzstützung bzw. die Bereitstellung von Regelenergie zur Zwischenspeicherung von Strom aus fluktuierenden Erzeugern wie der Photovoltaik, in portablen Geräten genauso wie in elektrifizierten Antriebssträngen.

// Contact

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

// Our main focus

Our main task is to investigate and further develop energy storage systems. In order that accumulators and batteries are also safe and powerful under the most extreme conditions, our work focusses on characterising them under various operating conditions, determining their qualitative properties and investigating their behaviour with operating failures as well as accident situations.

Abuse tests

Using "abuse tests", we can assess the reactions and potential risks of accumulators when there is extreme damage as well as the resistance of accumulators relative to various abuse conditions and operating errors.

Battery system technology

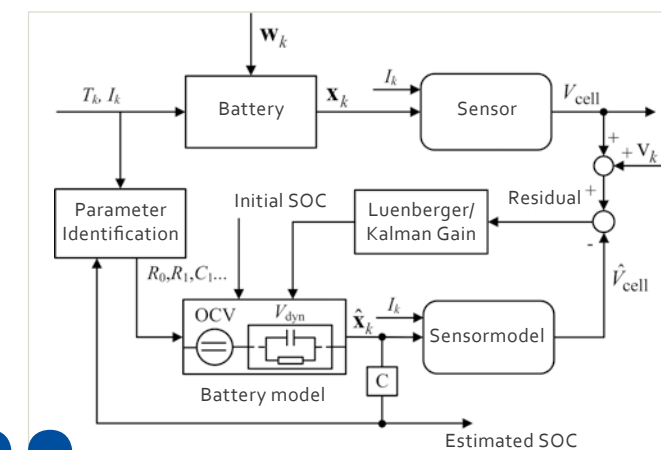
Our main tasks in the battery system technology field include determining the system conditions (state of charge and health), predicting the system performance, thermal and electrical modelling as well as simulating batteries and battery components. We have a wide range of different tests and simulations at our disposal. The knowledge gained is used for further developing and optimising specific accumulators and their operating methods for different applications. In particular, these include regulation and buffering of fluctuating energy sources, such as PV systems, in portable devices and electrified drive trains.

// Batteriesystemtechnik

Battery system engineering

// Batteriesystemtechnik

Grundlage der Batteriesystemtechnik ist die Charakterisierung der elektrischen und thermischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens von Batterien auf Zell- und auf Systemebene. Elektrische Tests werden im Zeitbereich (Pulsprofile, Ruhespannungskennlinien) und im Frequenzbereich (elektrochemische Impedanzspektroskopie) durchgeführt. Das thermische Batterieverhalten wird mittels Temperatursensoren und orts aufgelöst mittels Thermographie erfasst. Das test- und theoriebasierte Wissen über die Batterieeigenschaften wird in dynamische, adaptierbare Batteriemodelle übersetzt. Die Identifikation der Modellparameter erfolgt datenbasiert anhand von Testmatrizen, die den gesamten Arbeitsbereich der Batterie abdecken. Die Validierung der elektrischen und thermischen Modelle erfolgt durch reale Belastungsprofile wie Fahrzyklen, PV-Einspeiseprofile und Lastgangkurven. Die entwickelten Batteriemodelle werden für systemtechnische Aufgaben verwendet: u. a. die simulationsbasierte Auslegung und Dimensionierung von Speichern und die Entwicklung von Algorithmen für das Batteriemangement. Zu Letzteren zählen Ladestrategien sowie Verfahren der Zustandschätzung für den Lade- und Alterungszustand von Batterien. In der Batteriesystemtechnik wurden im Jahr 2012 in den genannten Bereichen fünf Forschungsprojekte erfolgreich abgeschlossen.



// Battery system engineering

The basis of battery system engineering is the characterisation of electrical and thermal properties as well as the performance and lifetime investigations of batteries at the cell and system level. Electrical tests are conducted in time domain (pulse profiles, characteristic curves of the open-circuit voltage) and frequency domain (electrochemical impedance spectroscopy). The thermal battery behaviour is recorded using temperature sensors and spatially resolved by means of thermography. The test- and theory-based knowledge on the battery properties is translated into dynamic, adaptable battery models. The identification of the model parameters is based on data from test matrices that cover the entire working area of the battery. The electrical and thermal models are validated using real load profiles such as driving cycles, PV feed-in profiles and load curves. The developed battery models are used for system-related tasks such as the simulation-based design and dimensioning of storage systems and the development of algorithms for the battery management system. These algorithms include charging strategies and processes for estimating the charge and health state of batteries. In 2012, five research projects were successfully concluded in the aforementioned areas in the battery system engineering field.

// Strukturdiagramm der modellbasierten Ladezustandsschätzung.
// Structure diagram of the model-based state of charge (SOC) estimation.

// Contact

Dr. Michael Danzer
E-mail: michael.danzer@zsw-bw.de
Phone: +49 (0)731 95 30-551

// Dr. Harry Döring

Wir prüfen Akkumulatoren unter extremen Bedingungen und stellen so schnell fest, wie sicher, langlebig und qualitativ hochwertig sie sind.

We test accumulators under extreme conditions and thus quickly determine safety, durability and degree of quality.



// Batteriesicherheitstests

Battery safety testing

// Sicherheitsaspekte von Batterien für mobile Anwendungen

Die Realisierung effizienter Mobilität auf Basis von Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie die Zwischenspeicherung elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen erfordern eine stetige Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte der Batterien. Bei der Entwicklung solcher Batterietechnologien mit neuen chemischen Prozessen und Materialien können sich zusätzliche Probleme für die Betriebssicherheit und die Gewährleistung der Sicherheit in abnormalen Betriebszuständen (z. B. Ausfall von Überwachungseinrichtungen) ergeben. Neben der Bestimmung der elektrischen Parameter von Batterien ist es unabdingbar, ihr Verhalten in Extremsituationen zu verstehen, um das Gefahrenpotenzial abzuschätzen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu realisieren. Für die Gefahrenklassifizierung werden unterschiedliche Missbrauchsuntersuchungen (mechanisch, elektrisch, thermisch) durchgeführt.

Die dafür im Rahmen des Konjunkturpakets II beschafften Geräte und Ausrüstungen wurden 2012 vollständig in Betrieb genommen und sowohl für die eigenen Forschungsaufgaben als auch für Forschungs- und Qualifizierungsdienstleistungen eingesetzt. Drei Testbunker mit entsprechender Abgasbehandlung und Brandlöscheinrichtungen stehen für die Ausführung von Sicherheitsuntersuchungen an Batterien zur Verfügung. Unsere Spezialisierungen sind mechanische Tests (nail penetration, quasistatische Crush-Untersuchungen), thermische Tests (Brandtests, thermische Stabilitätsuntersuchungen) und elektrische Tests (Kurzschluss, Überladung, Überentladung).

// Safety aspects of batteries in mobile applications

The realisation of an efficient mobility on the basis of electric and hybrid vehicles and buffering of electrical energy from renewable sources require a continuous increase in power and energy density of batteries, which, on the other hand requires new battery technologies with new chemical processes and materials. As a consequence of this, additional problems might be caused in terms of battery safety aspects. An acceptable remaining risk has to be ensured even under abuse conditions (e.g. caused by the loss of functionality of control units). Therefore, it is absolutely necessary to understand battery behaviour in extreme abuse situations (mechanical, electrical and thermal) in order to evaluate the risk and hazard potential and to initiate actions to minimise the remaining risk potential. Different abuse tests are carried out in order to make a hazard potential classification.

The equipment, devices and facilities purchased within the Economic Stimulus Package II have been put completely into operation in 2012 and were intensively used for our own research projects as well as for research and qualification service of customers. 3 bunkers with corresponding waste gas treatment and fire extinguishing systems are available for safety investigation of batteries, with the specialisation for mechanical impact (nail penetration, quasi static crush), thermal testing (fire exposure, thermal stability) and electric tests (short circuit, overcharge, over discharge).

// Hydraulische Presse für quasistatische Crush-Tests. 100 Tonnen vertikal, 50 Tonnen horizontal, 2 Tonnen schneller Nagelzylinder.
// Hydraulic press for quasistatic crush tests. 100 tonnes vertically, 50 tonnes horizontally, 2-tonne rapid nail cylinder.

// Contact

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

// Elektrische Batterietests

Electrical battery testing

// Elektrische Untersuchung von Batterien und Batteriesystemtechnik

Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens von Batterien werden Zellen und Module Performance- und Lebensdauertests unterzogen. Die realitätsnahe Charakterisierung von Batterien erfolgt mittels anwendungsspezifisch zugeschnittener Prüfpläne zur Erfassung des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Belastung. Zur Verfügung steht eine Vielzahl an Testkanälen mit unterschiedlichen Leistungsklassen von Kleinzellen bis zu Hochvoltspeichern.

Zur Simulation der thermischen Umgebung wurden Klimakammern verschiedener Größen bis hin zur befahrbaren Kabine für Elektrofahrzeuge angeschafft. Die im Rahmen des Konjunkturpakets II beschafften Geräte und Ausrüstungen wurden 2012 vollständig in Betrieb genommen und sowohl für die eigenen Forschungsaufgaben als auch für Forschungs- und Qualifizierungsdienstleistungen eingesetzt.

Die Testkapazitäten für elektrische Batterietests umfassen derzeit: ca. 150 Zellprüfkanäle, davon 80 Kanäle bis 50 A, 40 bis 150 A und 20 bis 250 A, 6 Hochstromkanäle bis 700 A, 50 Prüfkanäle für Module (bis ca. 100 V) im Strombereich von 50 A bis 400 A, 12 Prüfkanäle für gesamte Batteriepacks im Spannungsbereich von 300 bis 1000 V und im Strombereich von 250 bis 600 A. Die Prüfkanäle sind zum Teil parallelisierbar zur Erhöhung der Stromklasse. Alle Prüfungen und Tests erfolgen computergesteuert, wobei die Prüflinge in entsprechenden Temperaturkammern in separat geschützten Prüfräumen untergebracht werden. Erhöhte Sicherheit im Batterietestfeld gewährleisten Teststände mit einer unabhängigen Überwachungseinheit, in die auch eine mobile Feuerlösch-einrichtung integriert werden kann.

// Electrical investigation of batteries and battery system technologies

To characterise the electrical properties, performance capability and ageing behaviour of batteries, the cells and modules undergo performance and service lifetime tests. Tailor-made, application-specific test plans for recording load profiles are used to characterise the batteries as realistically as possible. A diverse range of test channels are available for this purpose with different performance classes, ranging from small cells to high-voltage storage systems.

To simulate the thermal environment, climate chambers in various sizes have been procured along with drive-in cabins for electric vehicles. The devices and equipment acquired as part of the German government's Economic Stimulus Package II entered into full operation in 2012 and are used both for ZSW's own research tasks as well as for research and qualification services.

The test capacities for electrical battery tests currently comprise approximately 150 cell test channels, of which 80 range up to 50 A, 40 up to 150 A and 20 up to 250 A; there are 6 high-current channels up to 700 A, 50 test channels for modules (up to approx. 100 V) in the 50-400 A current range as well as 12 test channels for entire battery packs in the 300-1000 V voltage range and in the 250-600 A current range. The test channels can be partly parallelised to increase the current class. All verifications and tests are computer controlled, whereby the test samples are housed in corresponding temperature chambers in separately protected test rooms. Test rigs with an independent monitoring unit, in which a mobile fire extinguisher device can also be integrated, ensure increased safety in the battery test field.

// Contact

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

// Abb. ganz oben: Befahrbare Klimakammer für die thermische Umgebung von elektrischen Batterietests an Elektrofahrzeugen.
// Fig. on top: Drive-in climate chamber, which provides the thermal environment for electric battery tests on electric vehicles.

// Abb. links: Batteriepackteststand mit dahinterliegendem Testraum und Temperaturkammer.
// Fig. left: Battery pack test rig with the test room and temperature chamber behind it.

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

// Unsere Kernkompetenzen

Materialien für die nächste Generation von Brennstoffzellen
Flüssige Brennstoffe wie z. B. Alkohole in Polymerelektrolyt-membran-Brennstoffzellensystemen (PEMFC) sind hinsichtlich Brennstofflogistik und Energiedichte attraktiv. Durch komplexe elektrochemische Vorgänge an der Alkoholelektrode sind die Leistungsdichten alkoholbetriebener Zellen allerdings geringer als die Leistungsdichten wasserstoffbetriebener Zellen. Neue Ansätze zur Steigerung der Aktivität der elektrochemischen Oxidation von Alkoholen können durch das Verständnis der elektrochemischen Prozesse der PEMFC erforscht werden. Ein weiterer Schwerpunkt sind Untersuchungen zur Vermeidung oder Minimierung von Edelmetallkatalysatoren. Im Fokus der experimentellen Arbeiten stehen Arbeiten an neuen Funktionsmaterialien, die Entwicklung neuer Konzepte für Elektroden, Membran-Elektroden-Anordnungen sowie die Bestimmung der Beständigkeit von Dichtungen oder Bipolarplatten.

Technologien für neue Energiespeicherkonzepte

Die effiziente Speicherung von elektrischer Energie wird zur zentralen Herausforderung der sicheren Energieversorgung in den kommenden Jahren. Dabei rücken Verfahren wie beispielsweise die Redox-Flow-Zellen oder Metall-Luft-Zellen wieder in den Fokus der Forschungsarbeiten. Die Erzeugung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff über Elektrolyse gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Wasserstoffqualität ist von entscheidender Bedeutung für die Lebensdauer und die Betriebssicherheit von Brennstoffzellensystemen.

Unser Team hat langjährige Erfahrung auf den genannten Gebieten und verfügt über die entsprechende Infrastruktur und Möglichkeiten, neue technologische Ansätze schnell im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren.



// Contact

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

// Our main focus

Materials for the next generation of fuel cells

The use of alcohols as a fuel in polymer electrolyte membrane fuel cell systems (PEMFC) is attractive not just in terms of the fuel logistics but also the energy density. As a result of the complex electrochemical processes on the alcohol electrode, alcohol-operated cells have lower power densities than hydrogen-operated cells. An in-depth understanding of the electrochemical processes of PEMFC will make it possible to research new approaches for increasing the electrochemical oxidation activity of alcohols or to investigate possibilities for minimising or avoiding noble metal catalysts. Our experimental work focusses on investigating new function materials, developing new concepts for electrodes, membrane electrode arrangements, as well as determining the durability of sealings or bipolar plates.

Technologies for new energy storage concepts

The efficient storage of electrical energy will become a central challenge facing energy supplies in the next few years, whereby the focus will be on new topics such as redox flow cells and metal-air cells. The generation of hydrogen as a secondary energy carrier by electrolysis will become increasingly important. In addition, hydrogen quality is of crucial importance with regard to lifetime and reliability of fuel cell systems.

Our team benefits from its many years of experience in this area and has the infrastructure and ability to quickly verify and demonstrate new technological approaches in the laboratory.

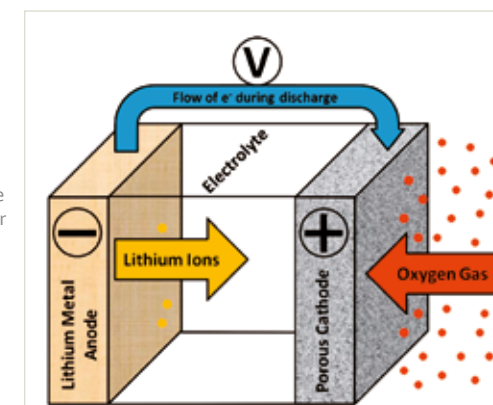
// Lithium-Luft-Batterien Lithium air systems

// Lithium-Luft-Batterien

Die moderne Gesellschaft hängt in vielfältiger Weise von der Nutzung verlässlicher elektrochemischer Energiespeicher ab. In jüngster Zeit fand eine neue Art aufladbarer Batterien, nämlich Li-O₂-Batterien, besondere Beachtung. Mit einer theoretischen spezifischen Energie von maximal 11 700 Wh kg⁻¹, die annähernd den Werten für flüssige Kraftstoffe entspricht, gehören wieder-aufladbare Li-O₂-Batterien zu den Topkandidaten für den Antrieb zukünftiger Generationen von Elektrofahrzeugen.

Die am ZSW durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind darauf ausgerichtet, die grundlegenden Fragen des Li-O₂-Systems zu verstehen. Eine der größten Herausforderungen ist die Wahl eines geeigneten Elektrolyten, der ein mehrfaches Zyklieren der Li-O₂-Batterie erlaubt. Hierzu wurden das elektrochemische Verhalten einer Li-O₂-Batterie, bestehend aus einer Li-Metall-Anode, einer kohlenstoffbasierten Kathode und einem aprotischen Elektrolyten, untersucht. Aufgrund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften wurde ein langkettiger Ether, Tetraethylenglykol-Dimethylether (TEGDME), als Basislösungsmittel gewählt. Die Ergebnisse ermöglichten ein tieferes Verständnis der Stabilität des Elektrolyten. Ferner konnte die mehrfache Zyklierbarkeit einer Li-O₂-Vollzelle gezeigt werden.

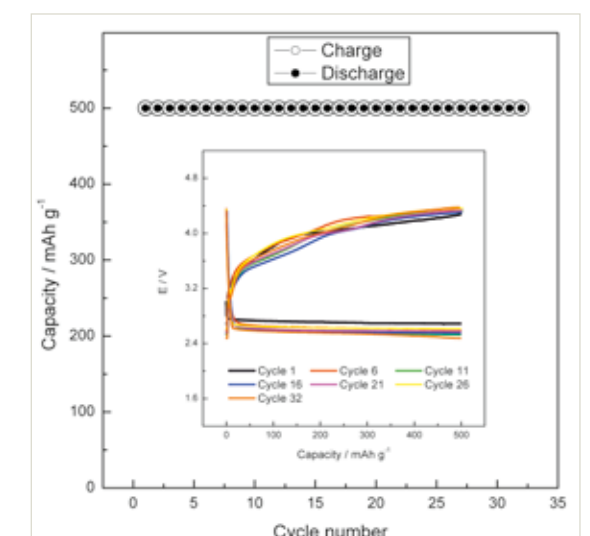
// Schemazeichnung einer Li-O₂-Zelle (rechts) und Zyklierverhalten einer Li-O₂-Zelle (ganz rechts).
// Schematic representation of a Li-O₂ cell (right) and electrochemical performance obtained from a Li-O₂ cell (far right).



// Lithium air

Modern society depends on the widespread use of reliable devices for electrochemical energy storage and conversion. Lately, a new class of rechargeable batteries has attracted considerable interest. With a theoretical specific energy of nearly 11,700 Wh kg⁻¹, which is close to the value known for liquid fuels, rechargeable Li-O₂ batteries can be considered as top candidates for electric vehicles.

The research currently carried out at the ZSW focuses on understanding the basic principles of the Li-O₂ systems. One of the greatest challenges is represented by the choice of a suitable electrolyte, which may allow repeated cycling of a Li-O₂ battery. In view of this, the electrochemical performance of Li-O₂ batteries consisting of a non-aqueous aprotic electrolyte, a carbon-based cathode and lithium metal anode were investigated. A long chain ether, Tetraethylene glycol dimethyl ether (TEGDME), was therefore selected due to its favorable physical/chemical properties. The results obtained gave a deeper understanding about the stability of the proposed electrolyte, showing that rechargeability of Li-O₂ electrochemical cells can be obtained.



”

// Dr. Ludwig Jörissen

Im Mittelpunkt unserer Arbeiten stehen neue Materialien und Komponenten für Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Redox-Flow-Batterien und Metall-Luft-Zellen.

Our work focuses on new materials and components for fuel cells, electrolyzers, redox flow batteries and metal-air cells.

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

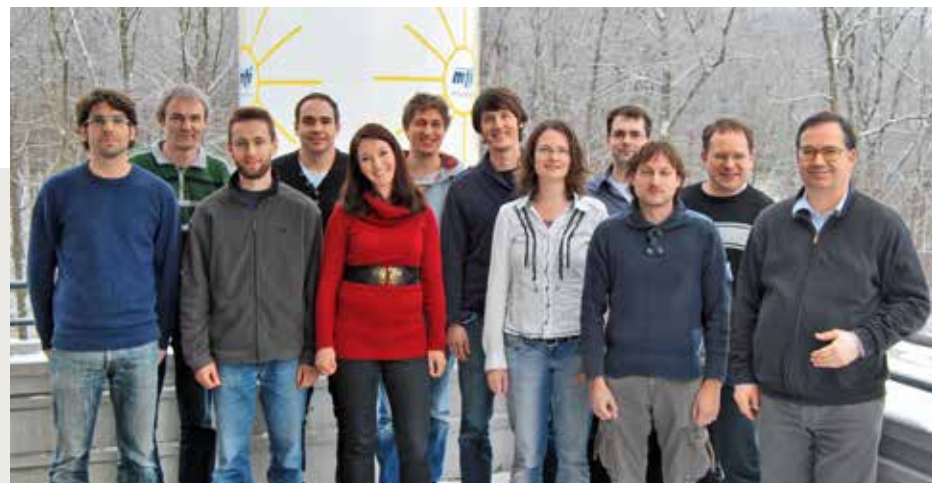
// Unsere Kernkompetenzen

Entwicklung von PEMFC

Das Fachgebiet arbeitet an der Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC)-Technologie, -Komponenten und -Stacks mit einem Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 100 kW_{el}. Wir optimieren Brennstoffzellen auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Das umfasst unter anderem die Abschätzung von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von Herstellertechniken und die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks. Neu ergänzt eine Test- und Entwicklungsplattform für Fahrzeug-Brennstoffzellen unser Kompetenzspektrum.

Modellierung, Simulation und experimentelle Charakterisierung

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels Simulationssoftware ein. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen (GDL) mittels μ -CT-Anlage validiert, die die GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich des Wasserhaushalts untersucht. 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 Werten gehören.



// Contact

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

// Our main focus

Development of PEMFCs

The research department works on the development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) technology, components and stacks with outputs ranging from just a few watts to 100 kW_{el}. We optimise the output, service life, efficiency and compactness of the fuel cells. This work also involves estimating the ageing processes and failure analyses. We also focus on developing manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks. Our range of expertise has been recently supplemented with a test and development platform for vehicle fuel cells.

Modelling, simulation and experimental characterisation

Modelling and simulating processes in fuel cells enable the structures of components and operating conditions to be quickly optimised. This includes the development and establishment of completely new approaches using simulation software. The simulation results are verified with informative hardware and reality-based experiments. For example, the water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layer (GDL) structures is validated using a μ -CT scanning facility that also investigates the GDL structures, including the water content, under compressed conditions. 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 conduct together with the Helmholtz Centre Berlin (HZB). These technologies enable temporal and spatial resolutions that are among the best in the world.

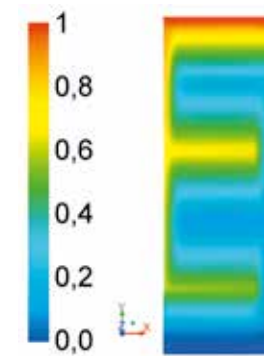
// Brennstoffzellen-Optimierung Fuel cell optimisation

// Optimierte Brennstoffzellendesign

Eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe Brennstoffzellenleistung besteht in einer gleichmäßigen Reaktandenverteilung über die Aktivfläche der Brennstoffzelle. Im Rahmen eines Industrieprojekts wurde ein hinsichtlich Reaktandenverteilung, Druckabfall und Kondensataustragsfähigkeit verbessertes Stackdesign entwickelt. Die Entwicklung erfolgte unter Einsatz der CFD-Software FLUENT®. Basis dieser Entwicklung ist ein kaskadiertes Flowfelddesign mit parallel verschalteten Mehrfach-Serpentinen-Gruppen. Die Flowfeldstruktur wurde in einem iterativen Prozess optimiert. Die Flowfelddesigns wurden hierbei unter Berücksichtigung zahlreicher Parameter wie der Geschwindigkeitsverteilungen im Flowfield und in der Gasdiffusionslage, der Reaktandenkonzentrationsverteilungen sowie der resultierenden Druckabfälle bewertet. Neben den Kanal- und Steggeometrien, die Anzahl und Orientierung der Mäander innerhalb der Kaskaden sowie die Anzahl und Orientierung der Kaskaden im Flowfield optimiert.

// Druckverteilung über eine Mäandergruppe in relativen Einheiten.

// Pressure distribution among a serpentine group in arbitrary units.

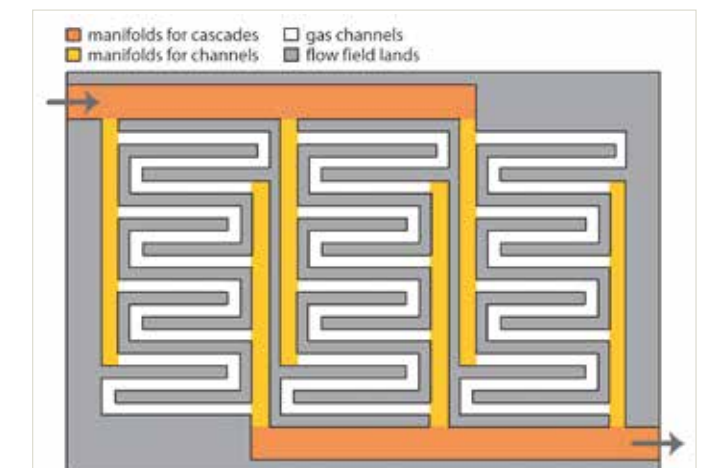


// Optimised fuel cell design

In order to achieve high fuel cell output, it is important that the reactant is evenly distributed across the active surface of the fuel cell. As part of an industrial project, an improved stack design was therefore developed in terms of the reactant distribution, pressure loss and ability to discharge condensation. The development was conducted using the FLUENT® CFD software and is based on a cascaded flow field design with parallel-connected multiple serpentine groups. The flow field structure was optimised in an iterative process. The flow field designs were assessed in accordance with numerous parameters such as the velocity distributions in the flow field and gas diffusion layer, the reactant concentration distributions and the resulting pressure losses. In addition to the channel arrangements, we also optimised the channel and web geometries, the number and orientation of the meanders within the cascades as well as the number and orientation of the cascades in the flow field.

// Schema der untersuchten Flowfeldgeometrie.

// Schematic view of investigated flow field geometry.



// Dr. Joachim Scholta

Wir optimieren Brennstoffzellen in Bezug auf Leistung, Lebensdauer und Fertigung. Neu ist eine eigens entwickelte Stack-Testplattform für Fahrzeug-Brennstoffzellen.

Our work focusses on optimising fuel cells with all their components in terms of their output, service life and production. New is our test platform for vehicle fuel cells.

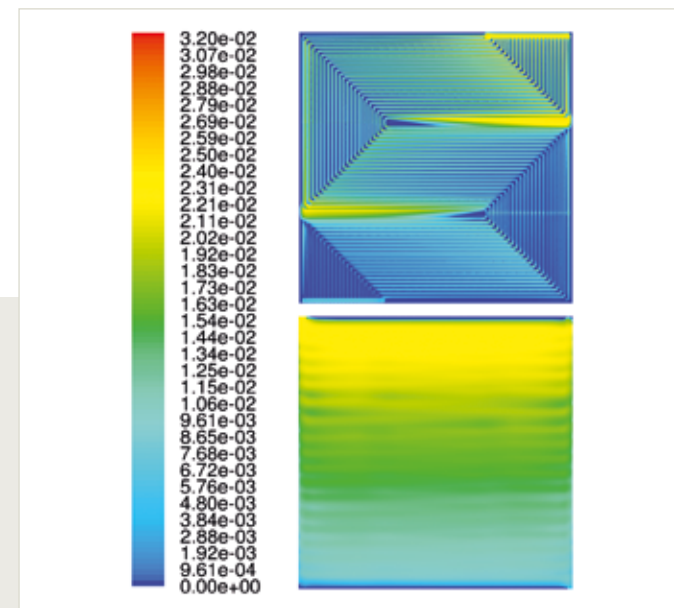
// Direkt-Methanol-Brennstoffzellen

Development of a MT-DMFC stack

// Entwicklung eines MT-DMFC-Stacks

Im Rahmen des Projektes „Innovative Materialien und Verfahren für Mitteltemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (MT-PEMFC)“ wird derzeit ein MT-Direkt-Methanol-Brennstoffzellenstack (MT-DMFC-Stack) für Betrieb bei 100–150 °C entwickelt. Neben dem Endplattendesign wurde insbesondere das Anoden-flowfield optimiert. Die Leistungsdichte konnte durch das neu entwickelte Medienverteilerfeld fast verdoppelt werden. Die Flowfieldauslegung erfolgte mit CFD, als Basis wurde ein Mehrfach-Mäander-Flowfield verwendet. Die Berechnungen zeigten, dass insbesondere bei hohen Stromdichten von 600 mA/cm² unterversorgte Bereiche auftraten. Deshalb wurde eine Stegbreitenvariation durchgeführt und schließlich ein optimiertes Flowfield mit geringerer Parallelisierung entwickelt. Dieses Flowfield zeigte bei hohen Stromdichten von 600 mA/cm² eine homogene Methanolverteilung und -abreicherung über den aktiven Bereich. Des Weiteren zeigten sich erhöhte Druckgradienten und Strömungsgeschwindigkeiten. Diese lassen einen besseren Austrag von gasförmigem Kohlendioxid erwarten. Messungen zeigten eine um den Faktor von mindestens 1,7 verbesserte Stromdichte (@400 mV) bei gleichzeitig verbessertem Umsatzverhalten.

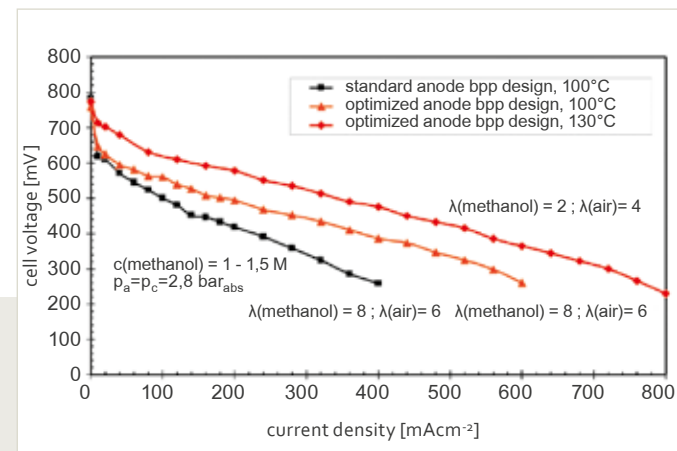
// Methanol-Massenanteil in der GDL bei 600 mA/cm². Zufluss rechts oben, Abfluss links unten. Basisflowfield (oben), optimiertes Flowfield (unten).
// Methanol mass fraction in the GDL at 600 mA/cm². Inflow: upper right, outflow: lower left corner. Basis Flowfield (top), Optimized Flowfield (down).



// Development of an MT-DMFC stack

As part of the “Innovative materials and processes for medium-temperature polymer electrolyte fuel cells (MT-PEMFC)” project, an MT direct methanol fuel cell stack (MT-DMFC stack) is currently being developed for operation between 100-150 °C. The anode flow field, in particular, was optimised, along with the end plate design. The newly developed media distribution field has enabled the power density to be almost doubled. The flow field has been designed using CFD, whereby a multiple meander field was used as the basis. The calculations showed that undersupplied areas occurred particularly with high current densities of 600 mA/cm². For this reason, the web width was varied, and an optimised flow field with lower parallelisation was then developed. This flow field displayed a homogenous methanol distribution and depletion across the active area at high current densities of 600 mA/cm². In addition, the pressure gradients and flow speeds were increased so that an improved discharge of gaseous carbon dioxide can be expected. Measurements have shown that the current density has improved by at least a factor of 1.7 (@400 mV) with improved utilisation behaviour occurring simultaneously.

// Strom-Spannungs-Kennlinien der entwickelten Direkt-Methanol-Brennstoffzellen. Schwarz = Referenzkennlinie mit Basisflowfield (100 °C), orange = Kennlinie mit optimiertem Flowfield (100 °C), rot = Kennlinie mit optimiertem Flowfield (130 °C).
// Current DMFC voltage curves. Black = Reference Curve with Basis Flowfield (100°C), orange = Curve with Optimized Flowfield (100°C), red = Curve with Optimized Flowfield (130°C).



// Hochdynamischer Betrieb von Brennstoffzellen

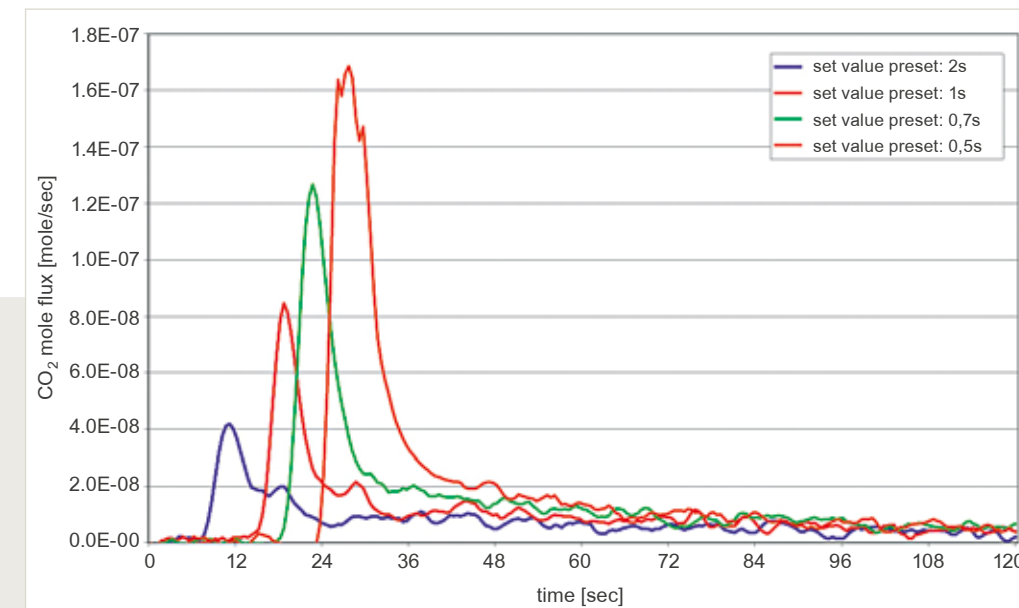
Highly dynamic operation of fuel cells

// Untersuchung der Zellerterung in hochdynamischen Betriebszuständen (FC Dynamics)

Die Lebensdauer von Polyerelektrolytmembran-Brennstoffzellenstacks (PEMFC) in hochdynamischen Anwendungen wie dem automobilen Bereich sind deutlich geringer als die Lebensdauern vergleichbarer Stacks im stationären Betrieb. Ziel des abgeschlossenen Projektes war die experimentelle und modellierende Identifizierung der Bedingungen, die für die deutlich schnellere Alterung der Zellen im hochdynamischen Betrieb verantwortlich sind. Im Rahmen des Projekts wurden verschiedene Flowfields im Hinblick auf das Verhalten in hochdynamischen Betriebszuständen untersucht und geeignete Flowfields und Betriebsstrategien identifiziert.

Geeignete Betriebszustände sowie zu erwartende orts aufgelöste Stromdichteverteilungen wurden mittels dynamischer Halb- und Vollzellmodellierung ermittelt. Zur Ergebnisvalidierung wurden Untersuchungen an einem für den hochdynamischen Betrieb optimierten Teststand durchgeführt. Die Validierung erfolgte unter Einsatz von orts aufgelöster Stromdichtemessung und durch Analyse des Produktgases hinsichtlich Alterungsprodukten.

Im Ergebnis konnte die Alterung der Brennstoffzelle mittels des Kohlenstoffabbaus als Funktion variierender Betriebszustände ermittelt werden. Die Ergebnisse erlauben eine Auslegung von Brennstoffzellen im hochdynamischen Betrieb sowie die experimentelle Ermittlung und Validierung von alterungsunkritischen Betriebsstrategien in hochdynamischen Betriebszuständen.



// CO₂-Entwicklung in Abhängigkeit von Betriebsparametern bei dynamischen Lastsprüngen.
// CO₂ release dependent on operating parameters at dynamic load changes.

// Contact

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

// Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)

// Unsere Kernkompetenzen

Brennstoffzellensysteme

Über 20 Jahre Erfahrung bilden unsere Basis für die schnelle und professionelle Entwicklung von Brennstoffzellensystemen für die unterschiedlichsten Anwendungen, von wenigen Watt bis 100 kW, von Bordstrom- und Notstromversorgungen über stationäre Anwendungen bis zu Fahrzeugsystemen. Unser Leistungsspektrum umfasst komplette Prototypen einschließlich Steuerung, Überwachung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Darüber hinaus unterstützen wir Industriepartner bei der Entwicklung und Erprobung von Systemkomponenten, bei Sicherheitsbewertungen, bei Packaging-Studien und bei der Produktzertifizierung.

Brennstoffzellentests

Zur Charakterisierung von Brennstoffzellenstacks, Systemen und Systemkomponenten betreiben wir ein Testzentrum/Prüffeld mit 20 vollautomatisierten Testständen. Die installierten Prüfstände und die Gasinfrastruktur ermöglichen Tests bis zu Leistungen von 120 kW_{el}. In einer Kältekabine können Stacks und Systeme bis -25 °C getestet werden. Die Vollautomatisierung der Teststände erlaubt kosteneffiziente Rund-um-die-Uhr-Untersuchungen. Eine umfangreiche Analytik ermöglicht die detaillierte Bewertung von Alterungsvorgängen und ausführliche Fehleranalysen.

Mikroreformer 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 Reformer Systeme.

// Our main focus

Fuel cell systems

More than 20 years of experience form the basis for the rapid and professional development of fuel cell systems for a wide range of applications, from a few watts to 100 kW, from on-board and emergency power supplies to stationary applications and automotive systems. Our scope of services comprises complete prototypes, including control, monitoring and hybridisation with batteries and DC/AC converters. In addition, we provide industry partners with support in developing and testing system components and with safety assessments, package studies and product certification.

Fuel cell tests

In order to characterise fuel cell stacks, systems and system components, we operate a test centre/testing facility with 20 fully automated test facilities. The installed test facilities and the gas infrastructure enable tests up to an electrical power of 120 kW_{el}. Stacks and systems can be tested in a refrigerated cabin with temperatures as low as -25 °C. Fully automated test facilities allow cost-effective 24/7 extended time tests. Different analysis systems enable detailed assessments of ageing processes and error reports.

Reformer for liquid fuels

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



// Contact
Dr. Alexander Kabza
E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de
Phone: +49(0)731 95 30-832

// Brennstoffzellen-Testzentrum

Fuel cell test centre

// Sicherheit für den Dauerbetrieb

Brennstoffzellen für Fahrzeuge oder zur Energieversorgung von Gebäuden müssen für den Markteintritt qualifiziert und auf Sicherheit im Dauerbetrieb untersucht werden. Das ZSW betreibt seit 2001 eines der europaweit größten Brennstoffzellen-Testfelder. Das Testzentrum ist für große Stacks ausgelegt und testet für OEMs Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme.

Tests nach DIN EN 62282-2

Die fortschreitende Marktreife von Brennstoffzellen führte zu international gültigen Normierungen von Prüfbedingungen. Die Norm DIN EN 62282-2 deckt alle sicherheitsrelevanten Prüfungen von Brennstoffzellenstacks und -modulen ab, die für die Zertifizierung zum Markteintritt zugrunde gelegt werden. Mit unserem Brennstoffzellen-Testfeld können alle Prüfungen nach DIN EN 62282-2 für Brennstoffzellen bis 100 kW durchgeführt werden. 2012 wurde für einen Industrieauftrag die Produktqualifizierung nach DIN EN 62282-2 an einem Brennstoffzellenmodul erfolgreich durchgeführt.

25.000 Stunden Brennstoffzellen-Dauertests

Seit Bestehen des Testfelds hat sich der langjährige Wasserstoff-Verbrauch durch Testbetrieb von Brennstoffzellenstacks und -systemen verdoppelt und stieg auf knapp 4 Tonnen. Ein weiterer Rekord waren die Dauertests mit akkumulierten 25.000 Teststand-Betriebsstunden. Umgerechnet auf die Anzahl der Stunden eines Kalenderjahrs bedeutet das rund drei Betriebsstunden pro Stunde, ohne Berücksichtigung von Rüstzeiten für die Einrichtung der Tests.

// Safety in 24/7 operation

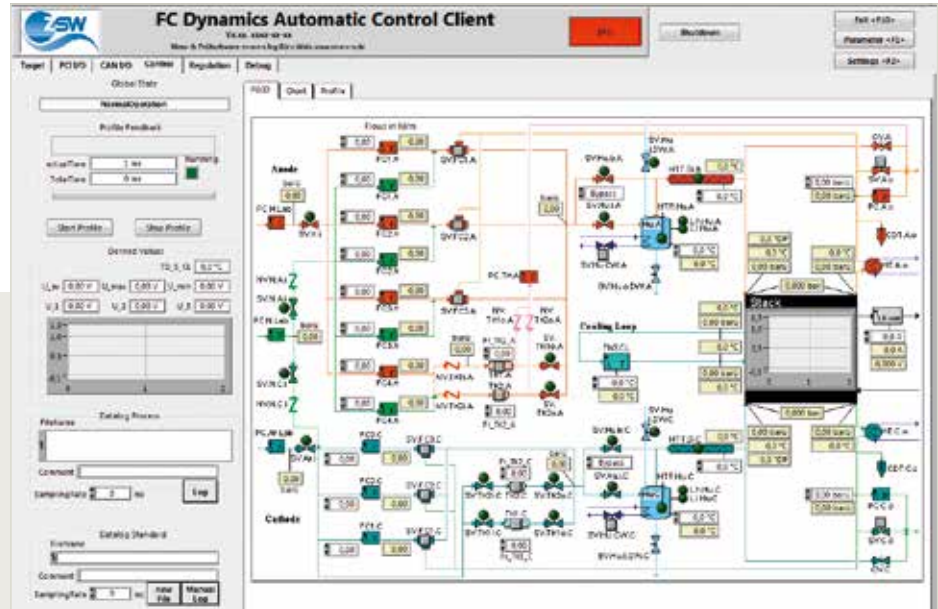
Fuel cells for vehicles or for supplying energy to buildings must be qualified for market entry and be tested in terms of their safety for continuous operation. The ZSW has been operating one of the largest fuel cell test fields in Europe since 2001. The test centre is designed for large stacks and tests fuel cells and fuel cell systems for OEMs.

Tests according to DIN EN 62282-2

The increasing market maturity of fuel cells has led to the internationally applicable standardisation of test conditions. The standard DIN EN 62282-2 covers all safety-relevant tests for fuel cell stacks and modules that provide the basis for certifying market entries. Our fuel cell test field enables all tests according to DIN EN 62282-2 to be conducted for fuel cells up to 100 kW. In 2012, product qualification according to DIN EN 62282-2 was successfully conducted on a fuel cell module for an industrial application.

25,000 hours of fuel cell durability tests

Since the test field came into being, its long-term hydrogen consumption for the testing of fuel cell stacks and fuel cell systems operation has doubled and has increased to almost 4 tonnes. A further record has been provided by the endurance tests with a total of 25,000 operating hours accumulated on the test rig. In terms of hours per calendar year, this corresponds to around three operating hours per hour, without taking into account the setup times for the tests.



// Grafische Benutzeroberfläche eines Brennstoffzellen-Teststandes.
// Graphical user layer interface of a fuel cell test stand.

// Mitarbeiter Verwaltung, Werkstatt und IT Staff in Administration, Workshops and IT

// Unsere Kernkompetenzen

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit am ZSW ist nicht allein durch die Labormitarbeiter, Ingenieure und Wissenschaftler erfolgreich. Viele Werkstatt-, IT- und Verwaltungsmitarbeiter sorgen dafür, dass Laboreinrichtungen funktionieren, Rechnungen gestellt und bezahlt werden, Internetplattformen aktuell sind, Büroabläufe reibungslos funktionieren und Veranstaltungen pünktlich beginnen.

Sie kümmern sich um alle Arbeiten, die über die Forschung des ZSW hinausgehen, und bilden vielfältige Schnittstellen nach innen und außen.

// Our main focus

The success of the research and development work at ZSW is not just thanks to the laboratory staff, engineers and scientists. Many workshop, IT and administrative staff also ensure that the laboratory facilities function, bills are invoiced and paid, Internet platforms are kept up to date, office procedures run smoothly and events take place on time.

They take care of all the work that goes beyond the research conducted at ZSW and provide diverse interfaces both internally and externally.



// Zentralbereich Finanzen, Personal & Recht
// Central Division Finance, Human Resources & Legal



// Leitungsteam Geschäftsbereich Photovoltaik (GBPV)
// Management team for the Photovoltaics Division (GBPV)



// Team Öffentlichkeitsarbeit
// Public Relations team



// Werkstatt Stuttgart
// Stuttgart workshop



// Leitungsteam Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien (GBEC)
// Management team for the Electrochemical Energy Technologies Division (GBEC)



// Werkstatt elektronisch Ulm
// Electronics workshop, Ulm



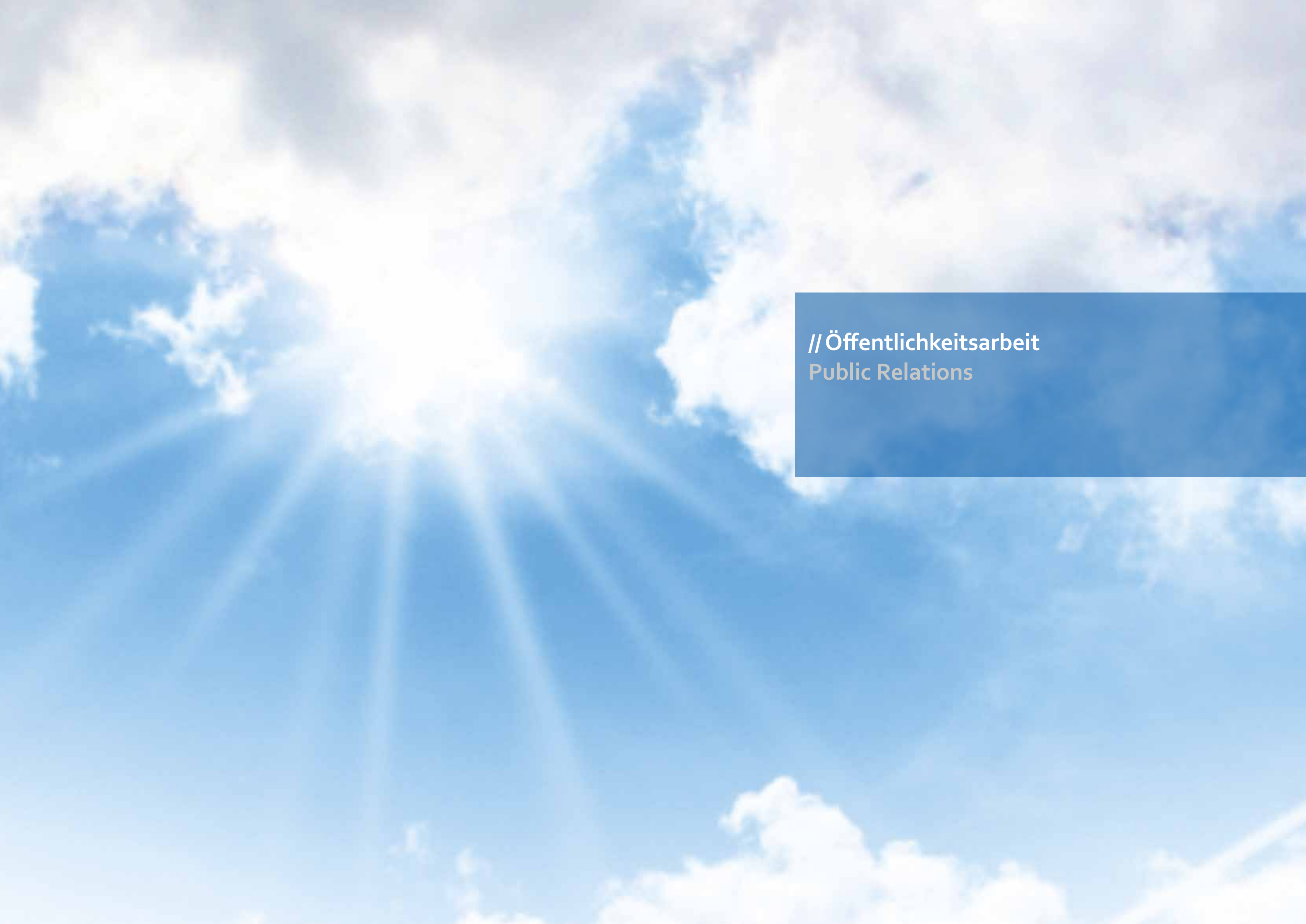
// Werkstatt mechanisch Ulm
// Mechanics workshop, Ulm



// IT und Patente Ulm
// IT and patents, Ulm



// IT Stuttgart
// IT Stuttgart



// Öffentlichkeitsarbeit
Public Relations



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

Die Zukunft erneuerbarer Energien lebt von der Akzeptanz der Bevölkerung, dem Engagement der Industrie, den Impulsen aus der Wissenschaft und der Förderung durch die Politik. Die Vermittlung der Forschungsergebnisse des ZSW an unterschiedliche Zielgruppen ist die Aufgabe des Teams Öffentlichkeitsarbeit. Dieser Rückblick vermittelt Ihnen einen Eindruck von unseren Veranstaltungen und der Medienarbeit des Jahres 2012.

The future of renewable energy sources depends on public acceptance, the commitment of industry, impetus from science and political support. The Public Relations team is tasked with conveying the results of ZSW's research to various target groups. This review provides you with an insight into our events and public relations work in 2012.

// Staatspräsidentin Costa Ricas besucht ZSW in Stuttgart

Im Rahmen ihrer Deutschlandreise besuchte Costa Ricas Staatspräsidentin Laura Chinchilla am 24. Mai das ZSW in Stuttgart. ZSW-Vorstand Prof. Frithjof Staiß informierte Laura Chinchilla, die sich stark für den Klimaschutz und erneuerbare Energien engagiert, über die neuesten Technologien des ZSW und Möglichkeiten zur Zusammenarbeit. Costa Rica will bis zum Jahr 2021 seinen kompletten Strombedarf mit erneuerbaren Energien decken. Dabei setzt das Land vor allem auf die Wasserkraft, die allerdings in der Trockenzeit deutlich niedrigere Strommengen erzielt. Deshalb plant die Regierung einen raschen Ausbau von Wind- und Sonnenenergie. Begleitet wurde der mittelamerikanische Gast von Peter Friedrich, dem baden-württembergischen Minister für Bundesrat, Europa und internationale Angelegenheiten.

// State President of Costa Rica visits ZSW in Stuttgart

On 24 May, Costa Rican President Laura Chinchilla visited ZSW in Stuttgart during her state visit to Germany. ZSW's Managing Director, Prof Frithjof Staiß, explained the latest technologies at ZSW and the possibilities for collaboration to Laura Chinchilla, who is very much committed to climate protection and renewable energies. Costa Rica wants to meet its entire electricity requirements with renewable energies by 2021. The country currently very much relies on hydropower, which, however, produces considerably smaller electricity volumes during the dry season. This is why the government is now looking to rapidly expand wind and solar energy. Peter Friedrich, who is the Minister for the Bundesrat, Europe and International Affairs in Baden-Württemberg, accompanied the guest from Central America.

// Ministerpräsident Kretschmann und Bundesumweltminister Altmaier am ZSW Stuttgart

Baden-Württembergs Ministerpräsident Winfried Kretschmann, Bundesumweltminister Peter Altmaier sowie sein baden-württembergischer Amtskollege Franz Untersteller besuchten am 23. Juli 2012 das ZSW. Im Fokus ihres Interesses stand neben den neuesten Trends in der Dünnschicht-Photovoltaik die maßgeblich am ZSW entwickelte Speichertechnologie Power-to-Gas (P2G®). Vorgeführt wurde die Betankung eines Erdgas-Autos mit Methan aus dem P2G®-Verfahren. Eine anschließende Probefahrt führte die Gäste zum neuesten ZSW-Projekt: der weltweit größten P2G®-Anlage mit einer Nennleistung von 250 kW. Altmaier, Kretschmann und Untersteller lobten das ZSW für sein Engagement und seine Innovationen auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien.

// Minister President Kretschmann and German Environment Minister Altmaier at ZSW Stuttgart

On 23 July 2012, ZSW was visited by Baden-Württemberg's Minister President Winfried Kretschmann, German Environment Minister Peter Altmaier and his counterpart in Baden-Württemberg, Franz Untersteller. In addition to the latest trends in thin-film photovoltaics, the main focus of their interest was the Power-to-Gas (P2G®) storage technology that was largely developed by ZSW. They were shown a natural gas vehicle being tanked with methane from the P2G® process. The subsequent test drive took the guests to the latest ZSW project: the world's largest P2G® plant with a rated output of 250 kW. Altmaier, Kretschmann and Untersteller praised ZSW for its engagement and innovation in the field of renewable energies.

// Costa Ricas Staatspräsidentin Laura Chinchilla, ZSW-Forscherin Theresa Friedlmeier und ZSW-Vorstand Frithjof Staiß.

// Costa Rica's President Laura Chinchilla, ZSW researcher Theresa Friedlmeier and ZSW's Managing Director Frithjof Staiß.



// Ministerpräsident Kretschmann und Bundesumweltminister Altmaier beim P2G®-Modell am ZSW.

// Minister-President Kretschmann and Federal Environment Minister Altmaier inspect the P2G® model at ZSW.



// Bund fördert die Erforschung seriennaher Fertigungsprozesse für große Lithium-Ionen-Batterien

„Wir haben uns das Ziel gesetzt, Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität zu machen. Der Aufbau einer Pilotfertigungsanlage für Lithium-Ionen-Zellen ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg dorthin“, so Ministerin Prof. Annette Schavan am 20. Juli 2012. Bei der Pressekonferenz übergab die Ministerin den Zuwendungsbescheid für eine Forschungsproduktionslinie in Höhe von 23,5 Mio. Euro. Die Anlage wird bis 2014 im ZSW-Labor für Batterietechnologie (eLaB) aufgebaut. Mitinitiator der Erweiterung ist der Industrieverbund Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen Batterien e.V. (KLiB).

// German government funds research of near-series production processes for large lithium-ion batteries

“We’re aiming to make Germany the leading provider for electromobility. The development of a pilot production plant for lithium-ion cells is an important milestone on the way there,” explained Federal Minister Prof Annette Schavan on 20 July 2012. At the press conference, the Federal Minister handed over the grant notice for a research production line for €23.5 million. The plant will be built at the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB) and completed by 2014. The co-initiator of the expansion project is the Lithium-Ion Batteries Competence Network (KLiB).

// Land fördert Gebäude für eine Forschungsproduktionslinie großer Lithium-Ionen-Zellen am eLaB

Das ZSW errichtet bis 2014 eine Anlage, die seriennahe Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Batterien erforschen soll. Im Fokus stehen prismatische Wickelzellen mit 20 Ah für Elektrofahrzeuge. Um die deutschlandweit einmalige Anlage aufzustellen, ist ein Erweiterungsbau für das eLaB geplant, den das Land Baden-Württemberg finanziert. Am 4. September unterzeichnete Finanz- und Wirtschaftsminister Dr. Nils Schmid im eLaB die Absichtserklärung in Höhe von 6 Mio. Euro. Die Architektenplanung für das Gebäude mit 3.000 m² hat begonnen. Kooperationspartner sind die Unternehmen des Industrieverbundes KLiB.

// Federal state funds building for research production line for large lithium-ion cells at eLaB

ZSW is constructing a plant to research near-series production processes for lithium-ion batteries. Scheduled for completion in 2014, the focus will be on 20-Ah prismatic coil cells for electric vehicles. In order to set up the plant, which is unique in Germany, the plan is to build an extension to the eLaB that is being funded by the Federal State of Baden-Württemberg. On 4 September, the Minister for Finance and Economics, Dr Nils Schmid, signed the six-million-euro Declaration of Intent in the eLaB. Architects have started work on designing the building, which will be 3,000 m² in size. Companies from the KLiB industrial federation will be involved as cooperation partners.



// KLiB-Vorsitzender Jäger, ZSW-Vorstand Staiß, Bundesministerin Schavan und ZSW-Vorstand Tillmetz bei der Übergabe des Bewilligungsbescheides.

// KLiB Chairman Jäger, ZSW Managing Director Staiß, Federal Minister Schavan and ZSW Board Member Tillmetz at the handover of the grant approval.



// Landesfinanz- und Wirtschaftsminister Nils Schmid und Landtagsabgeordneter Martin Rivoir beim Rundgang durch das eLaB in Ulm.

// Minister for Finance and Economics, Nils Schmid, and Member of the State Parliament Martin Rivoir visit the eLaB in Ulm.

// Regionalpräsident Queyranne (2. v. l.) tankt regeneratives Methan mit dem Erdgasfahrzeug des ZSW.
// President Queyranne refuelling ZSW's natural gas car with renewable methane.



// Das ZSW stellt Batterien, Brennstoffzellen und die Speicherung erneuerbarer Energien auf der HMI 2012 vor (v. l.: F. Häußler (ZSW), J. Scholta (ZSW), R. Bomba (BMVBS), K. Bonhoff (NOW)).
// ZSW presented batteries, fuel cells and renewable energy storage systems at HMI 2012 (from left to right: F. Häußler (ZSW), J. Scholta (ZSW), R. Bomba (BMVBS) and K. Bonhoff (NOW)).



// Öffentlichkeitsarbeit
Public Relations

// Strategien zur Energiewende: Deutsch-französischer Austausch mit dem Präsidenten der Region Rhône-Alpes
Der Präsident der Region Rhône-Alpes, Jean-Jack Queyranne, informierte sich mit seiner Delegation in Begleitung von Baden-Württembergs Europaminister Peter Friedrich am 23. Februar in Stuttgart über ein gemeinsames Photovoltaikprojekt und andere Bausteine einer zukunftsfähigen Energieversorgung. Die französische Region Rhône-Alpes und das Land Baden-Württemberg wollen den Klimaschutz vorantreiben und die erneuerbaren Energien ausbauen. Am ZSW in Stuttgart unterrichtete sich Jean-Jack Queyranne beim geschäftsführenden ZSW-Vorstand Prof. Frithjof Staiß über aktuelle Strategien zur Energiewende. Vor allem das deutsch-französische Forschungsprojekt „Sol-ion“ stand im Interesse des Besuchers. Beteiligt daran sind unter anderem das ZSW und das in Rhône-Alpes angesiedelte Institut INES.

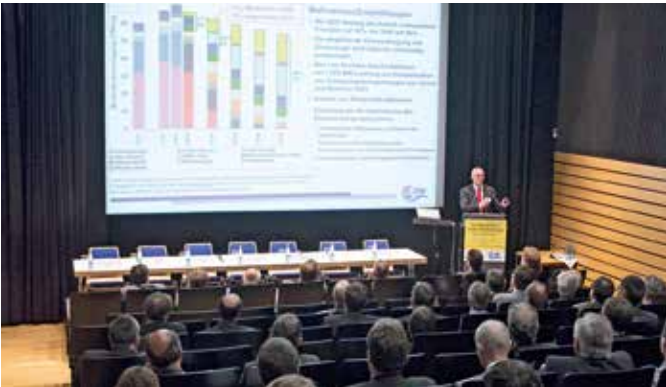
// Strategies for the energy revolution: German-French discussions with the President of the Rhône-Alpes region
On 23 February, a delegation headed by the President of the Rhône-Alpes region, Jean-Jack Queyranne, visited ZSW in Stuttgart. Accompanied by Baden-Württemberg's Europe Minister Peter Friedrich, they learnt about a joint photovoltaic project and other components of future sustainable energy supplies. The Rhône-Alpes region in France and the Federal State of Baden-Württemberg want to drive forward climate protection and expand renewable energies. At ZSW in Stuttgart, ZSW's Managing Director Professor Frithjof Staiß informed Jean-Jack Queyranne about the latest strategies for the energy revolution. In particular, the visitors were interested in the German-French "Sol-ion" research project. ZSW and the INES institute, based in Rhône-Alpes, are both involved in the project.

// ZSW und KEA veranstalten 2. Parlamentarischen Abend und ziehen Bilanz der grün-roten Energiepolitik
Unter dem Titel „Energiewende in Baden-Württemberg – wo stehen wir?“ fand die Veranstaltung von ZSW und der Klimaschutz- und Energieagentur Baden Württemberg (KEA) am 22. Mai statt. Nach einem Grußwort von Landesumweltminister Untersteller folgten Vorträge von Prof. Staiß zum Thema „Sonne und Wind“ sowie von KEA-Geschäftsführer Dr. Kienzlen zur Gebäudesanierung. Pforzheims Bürgermeister Uhlig sprach über Kraft-Wärme-Kopplung in der Kommune. An der Podiumsdiskussion wirkten die energiepolitischen Sprecher der Landtagsfraktionen mit.

// ZSW and KEA organise 2nd Parliamentary Evening and take stock of the green-red energy policy
The event, which was jointly organised by ZSW and Climate Protection and Energy Agency of Baden-Württemberg (KEA) and was held on 22 May, was entitled "Energy revolution in Baden-Württemberg – where do we stand?". Following the welcome address from State Environment Minister Franz Untersteller, talks were given by Professor Staiß on the topic "Sun and Wind" and by KEA Executive Chairman Dr Kienzlen on building refurbishment. The Mayor of Pforzheim, Alexander Uhlig, talked about combined heat and power in the municipality. The energy spokespersons from the various state parliamentary groups took part in the panel discussion.



// Parlamentarischer Abend von KEA und ZSW zum Thema „Energiewende in Baden-Württemberg“.
// The Parliamentary Evening organised by KEA and ZSW on the topic "Energy revolution in Baden-Württemberg".



// Das ZSW war 2012 auf folgenden Messen vertreten:
27. Symposium für photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein 29.2.–2.3.2012
Hannover Messe Industrie 23.–27.4.2012
Intersolar Europe, München 13.–15.6.2012
62. Nobelpreisträgertagung Lindau 1.–6.7.2012
13. UECT, Ulm 3.–5.7.2012
27. EU-PVSEC, Frankfurt am Main 25.–28.9.2012

// In 2012, ZSW was represented at the following trade fairs:
27th Symposium for Photovoltaic Solar Energy, Bad Staffelstein 29/02–02/03/2012
Hanover Industrial Trade Fair 23–27/04/2012
Intersolar Europe, Munich 13–15/06/2012
62nd Lindau Nobel Laureate Meeting 1–6/07/2012
13th UECT, Ulm 03–05/07/2012
27th EU-PVSEC, Frankfurt am Main 25–28/09/2012

// 13. UECT: Neueste Technologien für die Elektromobilität
Bei den 13. Ulm ElectroChemical Talks (UECT) vom 3. bis 5. Juli diskutierten Fachleute aus aller Welt über den neuesten Stand der Elektromobilität. Die Referenten berichteten vor rund 250 Experten aus 18 Ländern in über 40 Vorträgen über neueste Li-thium-Ionen-Batterien, Brennstoffzellen, Elektrolyseure für Wasserstoff, Supercaps und Redox-Flow-Zellen.

// 13th UECT: latest technologies for electromobility
At the 13th Ulm ElectroChemical Talks (UECT) gathering of experts from 3 to 5 July, specialists from all over the world discussed the latest state of technology for electromobility. Presenting to around 250 experts from 18 countries, speakers held more than 40 lectures on the latest lithium-ion batteries, fuel cells, hydrogen electrolyzers, supercaps and redox flow cells.

// Regenerative Mobilität am ZSW
Im Mai wurde das neue Elektrofahrzeug des ZSW, eine A-Klasse E-Cell von Mercedes-Benz, in Untertürkheim in Empfang genommen. Nach einer Einweisung in die Besonderheiten dieser neuen Generation batterieelektrischer Fahrzeuge fand die geräuschlose und emissionsfreie Fahrt zu unserem Standort in Stuttgart-Vaihingen statt. Das ZSW hat eines aus einer Flotte von 500 Fahrzeugen erworben. Am neu installierten, mit CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen bestückten Solar-Carport des ZSW können nun die Elektrofahrzeuge (E-Cell sowie zwei E-Bikes) regenerativ geladen werden.

// Renewable mobility at ZSW
In May, ZSW collected its new electric car, an A-Class E-Cell, from Mercedes-Benz in Untertürkheim. After being briefed about the specific features of this new generation of battery-powered vehicle, we enjoyed a soundless and emission-free journey to our headquarters in Stuttgart-Vaihingen. ZSW acquired the car from a fleet of 500 vehicles. ZSW's electric vehicles (the E-Cell and two e-bikes) can now be charged with renewable energy at ZSW's newly installed solar carport, which is equipped with CIGS thin-film solar modules.



// 13. UECT: Expertentreff zur Elektromobilität in Ulm.
// 13th UECT: Gathering of experts on electromobility in Ulm.



// Übergabe des Elektrofahrzeugs E-Cell in Untertürkheim.
// The E-Cell electric car is handed over in Untertürkheim.

// Abschlussevent auf der „Sonnenkönigin“ im Rahmen der 62. Nobelpreisträgertagung „Physik“.
 // Final event on the “Sonnenkönigin” during the 62nd Lindau Nobel Laureate Meeting.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations



// ZSW auf der 27. EU-PVSEC in Frankfurt/Main

An der bedeutendsten europäischen Photovoltaik-Tagung mit angeschlossener Messe, die im September 2012 in Frankfurt stattfand, beteiligte sich das ZSW mit zahlreichen Vorträgen und Publikationsbeiträgen sowie mit einem Messestand, der die wissenschaftlichen Ergebnisse der Materialforscher und Systemtechniker sowie die Prüfdienstleistungen des Testlabors Solab präsentierte.

// Industriekreis Batterieproduktion des VDMA besucht anlässlich seiner Jahrestagung das ZSW in Ulm

Auftakt der zweitägigen Veranstaltung am 18. Oktober war ein Besuch am eLaB, um sich über neueste Produktionstechnologien für Lithium-Ionen-Zellen zu informieren. ZSW-Vorstand Prof. Tillmetz berichtete dem VDMA-Industriekreis Batterieproduktion über Markttrends und Herausforderungen im stationären Bereich und für die Elektromobilität. Ein weiterer Themenschwerpunkt waren exemplarische F&E-Arbeiten zum Thema Sicherheitstest, Zellfertigung und Prozessforschung. Highlights des eLaB-Besuches waren die Laborführungen, bei denen Prozess-Schritte mit neuesten Geräten und Anlagen vorgeführt wurden, sowie die Fachgespräche zwischen Industrievertretern und Forschern.

// ZSW at the 27th EU-PVSEC in Frankfurt am Main

At Europe's most important photovoltaic conference with associated trade fair, which took place in September 2012 in Frankfurt, ZSW presented numerous lectures, publications and its own trade fair stand. This showcased the scientific results of the materials researchers and system technicians as well as the testing services provided by the Solab testing laboratory.

// As part of its Annual Conference, VDMA's Battery Production Industry Group visits ZSW in Ulm

The two-day event started on 18 October with a visit to the eLaB to find out about the latest production technologies for lithium-ion cells. The member of the ZSW Board Professor Tillmetz talked to the VDMA's Battery Production Industry Group about market trends and challenges in the stationary and electromobility fields. A further focus was on exemplary R&D work carried out on safety tests, cell production and process research. The highlights of the eLaB visits included the laboratory tours in which process stages were presented with the latest devices and systems and the specialist discussions between the industrial representatives and researchers.

// Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist nicht zuletzt aufgrund der attraktiven Themen des Instituts weiterhin erfolgreich. Insgesamt wurden 2012 rund 1.030 Presseergebnisse erzielt. Das ZSW konnte sich überregional wie folgt platzieren (Auszug):

- > Der Tagesspiegel: „Batterieherstellung in Deutschland“ (Interview Prof. Tillmetz, März)
- > Die Welt: „Sonnenstrom für die Energiewende“ (Namensartikel Prof. Powalla zur Photovoltaik, April)
- > Süddeutsche Zeitung: „Zerquetscht, geschmort, verbrannt“ (Artikel über Batterien, Juni)
- > FAZ: „Mit Wind die Energiewende auf Kurs halten“ (Namensartikel Dr. Musiol in der Energie-Beilage, Oktober)
- > Umfassende Medienresonanz zur Einweihung der P2G®-250-kW-Anlage, u. a. bei ZDF, 3sat nano, Regio TV, SWR, MDR

Die beste Resonanz erzielten folgende Forschungsthemen:

- > Einweihung 250-kW-Anlage Power-to-Gas.
- > Bund und Land geben insgesamt knapp 30 Mio. Euro für Forschungsproduktionslinie am eLaB.
- > Akkus von morgen – neue Batteriematerialien.
- > Neue Hochleistungs-Brennstoffzelle für Fahrzeugantriebe.
- > Den lukrativen Eigenverbrauch von Solarstrom mit Lithium-Ionen-Batterien erhöhen.

// Relaunch Internetseite

Die Visitenkarte des ZSW im Internet, www.zsw-bw.de, wurde modernisiert. Von der erweiterten Startseite über abonnierbare Nachrichten und den verbesserten Pressebereich bis hin zum komfortableren Downloadbereich zielt die Überarbeitung darauf ab, das Navigieren für den Besucher angenehmer zu gestalten. Dadurch haben sich die Zugriffszahlen seit dem Relaunch Mitte des Jahres um rund 50 % erhöht.

// Besuchergruppen

Besuchergruppen aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, u. a. aus Deutschland, der Türkei, Argentinien, Kuwait, Laos und den Donauländern, informierten sich am ZSW über neue Technologien für erneuerbare Energien.

// 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 2012, ZSW achieved 1,030 media results. These are the most important articles in national newspapers (excerpt):

- > Der Tagesspiegel: “Battery production in Germany” (interview with Professor Tillmetz, March)
- > Die Welt: “Solar power for the energy revolution” (article written by Professor Powalla on photovoltaics, April)
- > Süddeutsche Zeitung: “Crushed, stewed, burnt” (article on batteries, June)
- > FAZ: “Keeping the energy revolution on course with wind” (article written by Dr Musiol in the Energy supplement, October)
- > Extensive media response regarding the inauguration of the 250-kW P2G® plant, including from ZDF, 3sat nano, Regio TV, SWR and MDR

The best response was generated by the following research topics:

- > Inauguration of the 250-kW Power-to-Gas plant.
- > German government and federal state spend almost €30 million on research production line for the eLaB.
- > Tomorrow's batteries – new battery materials.
- > New high-performance fuel cells for vehicle drives.
- > Increasing lucrative self-consumption of solar power with lithium-ion batteries.

// Relaunch of the website

ZSW's visiting card on the Internet, www.zsw-bw.de, has been modernised. Ranging from the expanded homepage and the subscription-based news to the improved press area and the more convenient download section, the redesign has been aimed at making it easier for visitors to navigate the website. As a consequence, the number of online visits has increased by around 50% since the relaunch in the middle of the year.

// Visitor groups

Visitor groups from science, politics and business, including from Germany, Turkey, Argentina, Kuwait, Laos and the Danube countries, found out about new technologies for renewable energies at ZSW.



// Messestand des Geschäftsbereichs Photovoltaik auf der 27. EU-PVSEC.
 // The Photovoltaics Division's booth at the 27th EU-PVSEC.



// Das ZSW präsentiert der Wissenschaftsministerin Theresia Bauer im Rahmen der 62. Nobelpreisträgertagung „Physik“ neue Photovoltaikmaterialien.
 // ZSW presents new photovoltaic materials to Baden-Württemberg's Minister of Science, Theresia Bauer during the 62nd Lindau Nobel Laureate Meeting.

// 25 Jahre ZSW

Das 25-jährige Jubiläum der Gründung des ZSW am 16. März 1988 wird im nächsten Jahresbericht gewürdigt. Gleichwohl möchten wir aktuell an die Gründung des ZSW erinnern. Die folgende Jahreschronik fasst die einschneidenden Ereignisse nach stürmischen Aufbaujahren zusammen:



// 25 Years ZSW

The 25th anniversary of the founding of ZSW, which was founded on 16 March 1988, will be honoured in the next annual report. At the same time, we wish to mention the founding of ZSW in this report. The chronology below summarises the key events which followed the first stormy years:

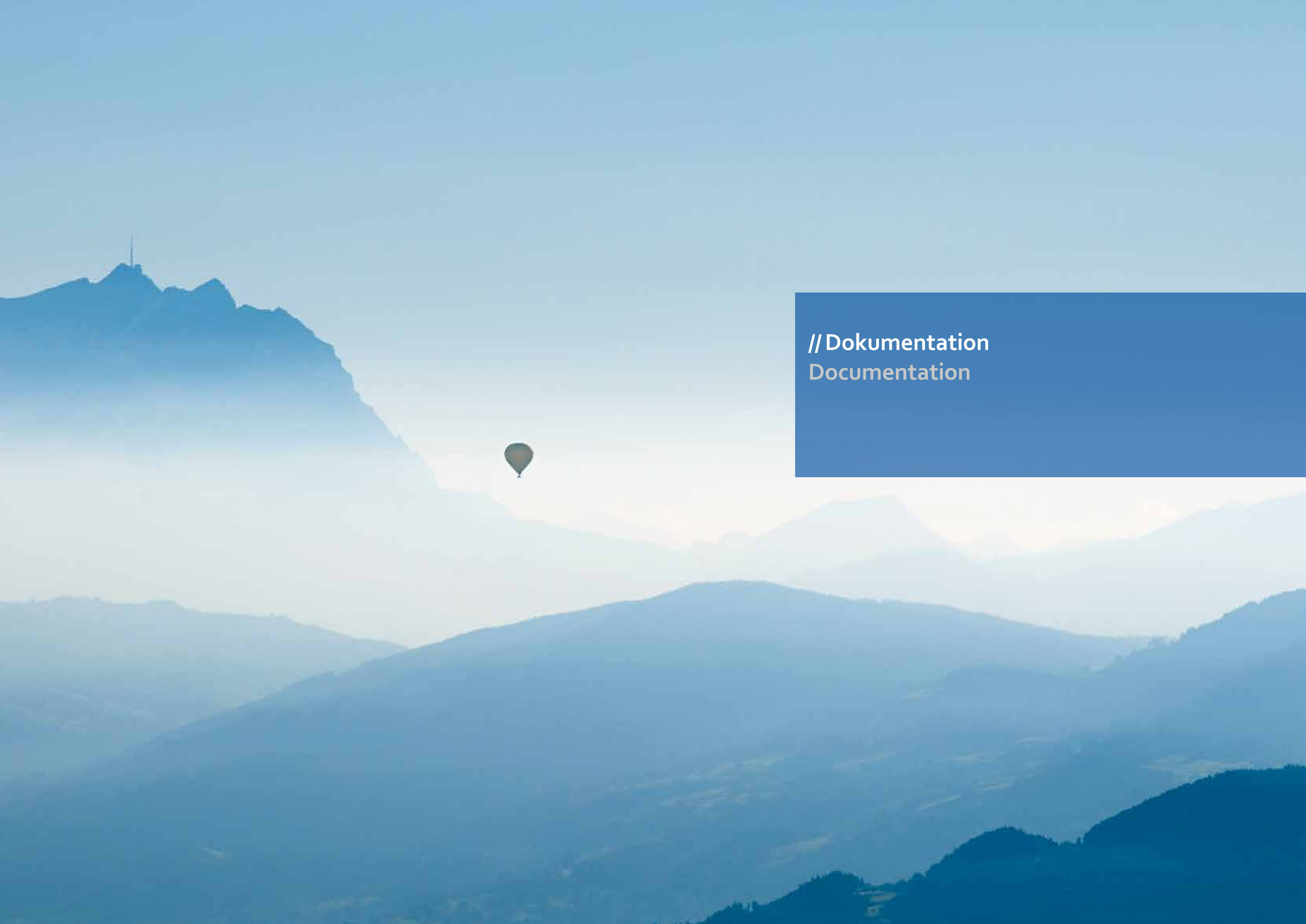


- 1988** Gründung der gemeinnützigen Stiftung
- 1989** Einweihung und Inbetriebnahme des Solar-Testfeldes in Widderstall/Merklingen auf der Schwäbischen Alb
- 1990** Kuratorium stimmt den Kooperationsverträgen mit den Universitäten Stuttgart und Ulm sowie dem DLR einstimmig zu
- 1991** Neubau des Institutsgebäudes am Standort Ulm
- 1992** Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht wird erster Geschäftsführender Vorstand
- 1993** Erstmals sind alle Fachgebiete am Standort Stuttgart unter einem Dach vereint
- 1994** Inbetriebnahme einer einzigartigen Solaranlage mit thermohydraulischem Antrieb auf dem Widderstall
- 1995** Erster Jahresbericht informiert die Öffentlichkeit über die zahlreichen Projektergebnisse
- 1996** Tod des Pioniers der Solarforschung und Mitbegründers des ZSW Prof. Dr. Werner H. Bloss
- 1997** Wirkungsgrad-Rekord bei CIS-Dünnschicht-Solarmodulen auf 30 cm x 30 cm bei 10 %
- 1998** 10 Jahre ZSW. Wissenschaft, Wirtschaft und Politik treffen sich im Haus der Wirtschaft
- 1999** Dr. Thomas Schott übernimmt die Aufgaben des Geschäftsführenden Vorstandes von Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht
- 2000** Pilotproduktionslinie für CIS-Dünnschicht-Solarmodule bei Würth Solar läuft an

- 2001** Industriauftrag in Millionenhöhe zum Aufbau einer erdgasbetriebenen PEMFC-Hausenergieversorgungsanlage
- 2002** Inbetriebnahme des Brennstoffzellen-Test- und Evaluierungszentrums in Ulm
- 2003** Feierliche Laborinbetriebnahmen an den Standorten Stuttgart und Ulm
- 2004** ZSW wird von der IHK als Ausbildungsbetrieb zugelassen
- 2005** Entwicklung eines Brennstoffzellensystems für Hybridbusse im Auftrag der US-Regierung
- 2006** Projektleitung und Koordination zur Evaluierung und Weiterentwicklung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG)
- 2007** Fachgebietsleiter Frithjof Staiß wird neuer Geschäftsführender Vorstand
- 2008** „Man müsste das ZSW heute erfinden, gäbe es dies nicht schon seit 20 Jahren“, so Ministerpräsident a.D. Günther H. Oettinger anlässlich der 20-Jahr-Feier
- 2009** 20-jähriges Bestehen des europaweit größten Solar-Testfeldes auf der Schwäbischen Alb
- 2010** Weltrekord für die Dünnschicht-Photovoltaik (Wirkungsgrad 20,3 %)
- 2011** Inbetriebnahme eLaB (ZSW Labor für Batterietechnologie) in Ulm
- 2012** Inbetriebnahme der 250 kW_{el}-Power-to-Gas-Anlage (P2G®) in Stuttgart

- 1988** Founding of the non-profit foundation
- 1989** Inauguration and commissioning of the solar test facility in Widderstall/Merklingen in the Swabian Alb
- 1990** The Board of Trustees unanimously approves cooperation agreements with the universities of Stuttgart and Ulm, as well as with the DLR
- 1991** Construction of the new institute building in Ulm
- 1992** Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht becomes the first Managing Director
- 1993** All research departments were brought together under one roof for the first time in Stuttgart
- 1994** Commissioning of a unique solar power system with thermohydraulic drive at the Widderstall testing facility
- 1995** First annual report informs the general public about the many project results
- 1996** Death of the pioneer of solar research and co-founder of ZSW, Prof. Dr. Werner H. Bloss
- 1997** Efficiency record for CIS thin-film solar modules with 30 cm x 30 cm at 10%
- 1998** 10 years of ZSW. Representatives from academia and politics meet in the Haus der Wirtschaft in Stuttgart
- 1999** Dr. Thomas Schott takes over as Managing Director from Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht
- 2000** Pilot production line for CIS thin-film solar modules at Würth Solar is launched

- 2001** Industrial order worth millions for the construction of a natural gas driven PEMFC building energy supply system
- 2002** Commissioning of the fuel cell test and evaluation centre in Ulm
- 2003** Official celebrations to mark the commissioning of the laboratory in Stuttgart and Ulm
- 2004** ZSW is certified as a vocational training establishment by the IHK (Chamber of Industry and Commerce)
- 2005** Development of a fuel cell system for hybrid buses on behalf of the US government
- 2006** Project management and coordination for the evaluation and further development of the EEG (Renewable Energy Sources Act)
- 2007** Department head Frithjof Staiß becomes the new Managing Director
- 2008** “We would have needed to invent ZSW today if it hadn’t already been in existence for 20 years” Minister President a.D. Günther H. Oettinger marking the 20th anniversary celebrations
- 2009** 20th anniversary of the largest solar test facility in Europe on the Swabian Alb
- 2010** World record for thin-film photovoltaics (efficiency 20.3%)
- 2011** Commissioning of the eLaB (the ZSW laboratory for battery technology) in Ulm
- 2012** Commissioning of the 250-kW_{el}-Power-to-Gas system (P2G®) in Stuttgart



// Dokumentation
Dokumentation

// Haushalt Budget Development



// Haushalt

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 26,3 Mio. € und damit deutlich unter dem Wert des Vorjahres. Wesentliche Ursache war, dass im Vorjahr hohe Einnahmen aus öffentlichen Zuwendungen für den Neubau des ZSW Labor für Batterietechnologie (eLaB) Ulm eingingen.

Das eLaB konnte sich national und international als führendes Zentrum für Batterietechnologie etablieren und steigende Erträge aus Auftragsforschungen und aus öffentlichen Forschungszuwendungen generieren. Die Einnahmen aus der Auftragsforschung erreichten mit 7,7 Mio € einen neuen Höchststand und lagen mit einem Zuwachs von + 18% deutlich über dem Vorjahreswert. Der Anteil der institutionellen Förderung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2012 um 0,2 Mio. € auf 3,9 Mio. € .

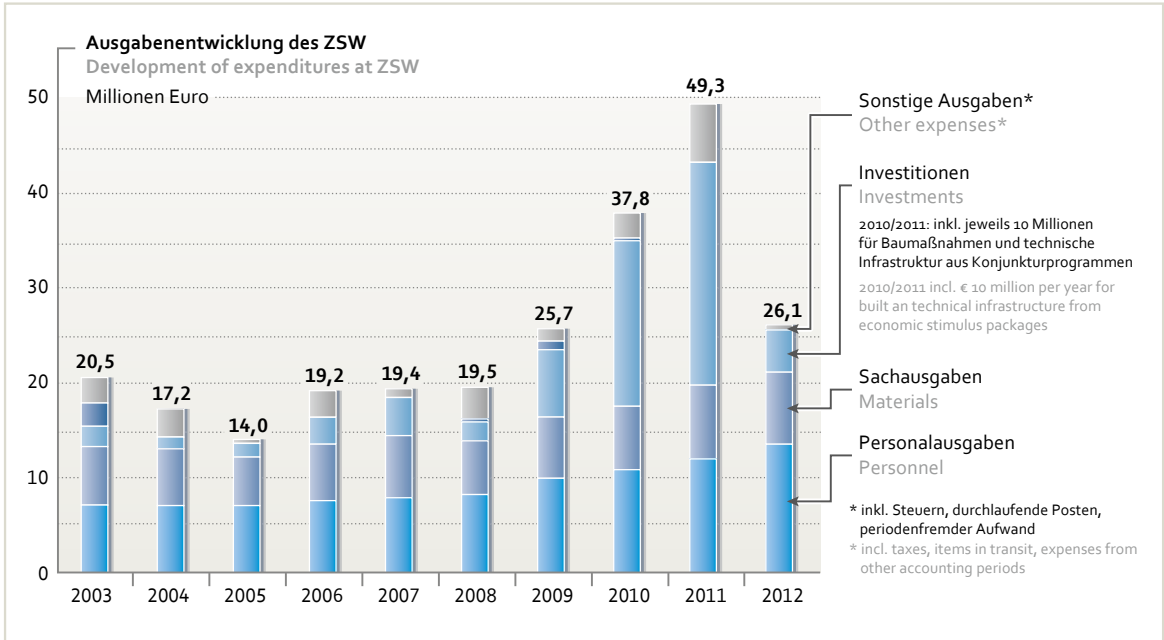
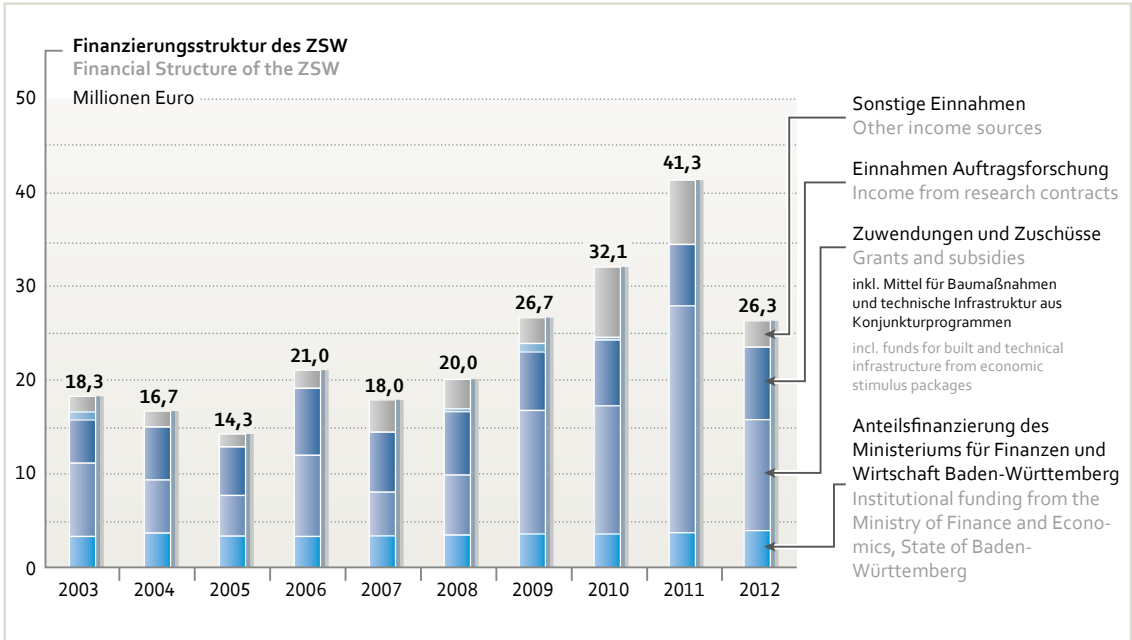
// Budget

In the past year, the income volume from normal business activities was €26.3 million and thus considerably lower than in the previous year. A main reason for this is that more revenue was received in the previous year from public grants for constructing the new ZSW Laboratory for Battery Technology eLaB in Ulm.

The eLaB has been able to establish itself as a nationally and internationally leading centre for battery technology and generate increasing revenues from contract research and public research grants. The revenue from the contract research reached a new record of €7.7 million and, with an increase of +18%, was therefore considerably more than the previous year's value. The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased in 2012 by €0.2 million to €3.9 million.

Das korrespondierende Ausgabenvolumen reduzierte sich gegenüber dem Vorjahr auf 26,1 Mio. €, i.W. durch den Rückgang des hohen vorjährigen Investitionsvolumens. Die Personalausgaben erhöhten sich durch das projektbedingte Wachstum der Belegschaft sowie durch Tarifsteigerungen.

The corresponding expenditure volume reduced relative to the previous year to €26.1 million, mainly due to a reduction in the high investment volume from the previous year. Personnel expenditure rose in accordance with the project-related expansion of the workforce and as a result of collectively bargained pay increases.



// Personalentwicklung Staff Development



IHK Region Stuttgart

IHK-Ausbildungsbetrieb

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

// Personalentwicklung

Wie in der mittelfristigen Finanzplanung und dem Wirtschaftsplan beabsichtigt, hat sich der Wachstumstrend beim Personal 2012 weiter fortgesetzt. Die Mitarbeiterkapazität erreichte zum 31. Dezember 205 Vollzeitstellen. Das entspricht 221 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Mit einem Anteil von 81 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität unverändert hoch.

Die Quote der unbefristeten Arbeitsverträge ist 2012 gegenüber dem Vorjahr praktisch gleich geblieben und liegt weiterhin bei 56 % aller Beschäftigten. Im wissenschaftlich-technischen Bereich liegt der Anteil der unbefristeten Arbeitsverträge bei 50,5 %.

Das ZSW beschäftigt derzeit fünf Auszubildende. In der mechanischen Werkstatt Stuttgart werden drei Auszubildende zum Industriemechaniker ausgebildet. In Ulm befinden sich eine Kauffrau für Bürokommunikation und eine Chemielaborantin in Ausbildung.

// Staff development

In accordance with our medium-term financial and economic plan, staff numbers continued to increase in 2012. By 31 December, the staff capacity reached 205 full-time equivalent positions. This corresponds to 221 employees. With 81% of all staff active in the scientific and technical area, a high level of productivity is still being achieved.

In 2012, the proportion of permanent employment contracts remained practically the same as the year before and still covers 56% of all employees. In the scientific and technical areas, 50.5% of those employed had permanent employment contracts.

ZSW currently employs five trainees. Three apprentices are training to become industrial mechanics at the mechanical workshop in Stuttgart. An office communications clerk and a chemical laboratory assistant are undergoing training in Ulm.

Im Berichtsjahr fertigten am Institut 25 Doktorand/innen ihre Dissertationen an.

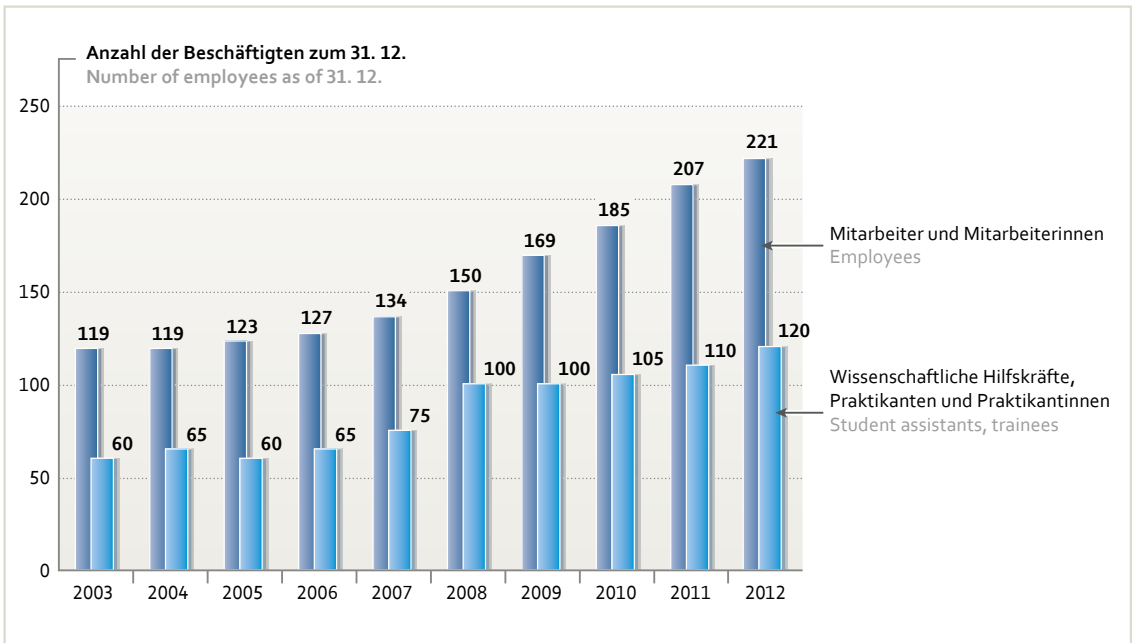
Neben den nach dem Tarifvertrag der Länder beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind am ZSW 120 Studierende und Praktikanten tätig. Von besonderer Bedeutung sind die Vernetzung mit Hochschuleinrichtungen und die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten.

Die Fort- und Weiterbildung mit sowohl fachspezifischen als auch fachübergreifenden Inhalten wurde mit sehr großem Erfolg in Anspruch genommen. Insgesamt fanden über 25 Fortbildungsveranstaltungen statt, an denen nahezu 120 Beschäftigte teilnahmen.

In the year under review, 25 PhD students worked on their theses at the institute.

More than 120 students and trainees are employed at ZSW in addition to the staff employed under the collective labour agreements of the federal states. The institute places particular importance on networking with universities and being actively involved in academic training through providing lectures, seminars and practical training as well as supervising final theses and dissertations.

The further and advanced training, with both specialist and interdisciplinary content, enjoyed considerable success. More than 25 further training events were held, in which almost 120 employees took part.



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

// Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften

// Publications in Books and Journals

/ Abou-Ras D. (HZB), Marsen B. (HZB), Rissom T. (HZB), Frost F. (IOM), Schulz H. (Zeiss NTS), Bauer F. (Oxford Instruments), Efimova V. (IFW), Hoffmann V. (IFW), Eicke A.; **Enhancements in specimen preparation of Cu(In,Ga)(S,Se)₂ thin films**; Micron 43 (2012) 470-474

/ Bastek J. (Univ. Münster), Stolwijk N. (Univ. Münster), Würz R., Eicke A., Albert J. (HZB), Sadewasser S. (INL); **Zinc diffusion in polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ and single-crystal CuInSe₂ layers**; Applied Physics Letters 101 (2012) 074105

/ Bauer A., Wahl T., Hanisch J., Ahlswede E.; **ZnO:Al cathode for highly efficient, semitransparent 4% organic solar cells utilizing TiO₂ and aluminium interlayers**; Applied Physics Letters 100 (2012) 073307

/ Bonucci A. (SAES Getters), Rondena S. (SAES Getters), Gallitognotta A. (SAES Getters), Gallina P. (SAES Getters), Salomon O., Wischmann W., Hiss S. (Kuraray); **Thin-film CIGS PV modules with more than 3000 h damp heat stability: Breakthrough time property of the B-Dry (R) edge sealant and its characterization**; Solar Energy Materials & Solar Cells 98 (2012) 398-493

/ Choi P.-P. (MPIE), Cojocar-Mirédin O. (MPIE), Würz R.; **Compositional gradients and impurity distributions in CuInSe₂ thin-film solar cells studied by atom probe tomography**; Surface and Interface Analysis (2012) 44, 1386-1388

/ Cojocar-Mirédin O. (MPIE), Choi P. (MPIE), Würz R., Raabe D. (MPIE); **Atomic-scale distribution of impurities in CuInSe₂-based thin-film solar cells**; Ultramicroscopy 111 (2011) 552-556

/ Cojocar-Mirédin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Würz R., Raabe D. (MPIE); **Exploring the p-n junction region in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells at the nanometer scale**; Applied Physics Letters 101 (2012) 181603

/ Ebert G. (FhG-ISE), Wille-Haussmann B. (FhG-ISE), Wittwer C. (FhG-ISE), Binder J., Luca de Tena D. (DLR), Braun M. (FhG-IWES), Mackensen R. (FhG-IWES), Tänzer G. (IZES); **Smart Grids – Transformation unserer elektrischen Energieversorgung**; FVEE Themen 2011: „Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem“, Tagungsband der FVEE Jahrestagung 2011, Berlin, 12.-13.10.2011, S. 104-111

/ Eisenbarth T. (HZB), Caballero R. (HZB), Kaufmann C. (HZB), Eicke A., Unold T. (HZB); **Influence of iron on defect concentrations and device performance for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells on stainless steel substrates**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications 20 (2012), pp. 568-574

/ Hariskos D., Menner R., Jackson P., Paetel S., Witte W., Wischmann W., Powalla M., Bürkert L. (WERes), Kolb T. (WERes), Oertel M. (WERes), Dimmler B. (WS), Fuchs B. (WS); **New reaction kinetics for a high-rate chemical bath deposition of the Zn(S,O) buffer layer for Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 20 (2012) pp. 534-542

/ Jehl Z. (IRDEP), Bouttemy M. (ILV), Lincot D. (IRDEP), Guillemoles J.-F. (IRDEP), Gerard I. (ILV), Etechberry A. (ILV), Voorwinden G. (WERes), Powalla M., Naghavi N. (IRDEP); **Insights on the influence of surface roughness on photovoltaic properties of state of the art copper indium gallium diselenide thin films solar cells**; Journal of Applied Physics 111 (2012) 114509

/ Kaifel A., Felder M., DeClercq C. (BIRA), Lambert J.-C. (BIRA); **New dynamic NNORSY ozone profile climatology**; Atmos. Meas. Tech. Discuss., 5, 775-812, 2012 www.atmos-meas-tech-discuss.net/5/775/2012/doi:10.5194/amtd-5-775-2012

/ Klugius I., Miller R. (EMD Millipore), Quintilla A., Magorian Friedlmeier T., Blázquez Sánchez D., Ahlswede E., Powalla M.; **Growth mechanism of thermally processed Cu(In,Ga)S₂ precursors for printed Cu(In,Ga)(S,Se)₂ solar cells**; Phys. Status Solidi RRL 6 (2012) pp. 297-299

/ Katzfuß A. (Univ. Stuttgart), Gogel V., Jörissen L., Kerres J. (Univ. Stuttgart); **The application of covalently cross-linked BrPPO as AEM in alkaline DMFC**; Journal of Membrane Science, 425-426 (2013) 131-140

/ Li J., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; **A comparative study of state of charge estimation algorithms for LiFePO₄ batteries used in electric vehicles**; Journal of Power Sources, Dec. 2012

/ Linssen J. (FZJ), Schulz A. (TU Berlin), Mischinger S. (TU Berlin), Maas H. (FFA), Günther C., Weinmann O. (Vattenfall), Bickert S. (FZJ), Danzer M., Hennings W. (FZJ), Lindwedel E. (Pöyry), Marker S. (TU Berlin), Schindler V. (TU Berlin), Schmidt A. (TU Berlin), Schmitz P. (FFA), Schott B., Strunz K. (TU Berlin), Waldowski P. (TU Berlin); **Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen**; Verlag des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie und Umwelt, Nummer 150, 1.10.2012

/ Löschel A. (ZEW), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F. und Ziesing H.-J. (AGEB); **Stellungnahme zum ersten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2011**; Expertenkommission zum Monitoring-Prozess Energie der Zukunft, Berlin, Mannheim, Stuttgart, Dez. 2012

/ Markötter H. (HZB), Alink R. (FhG-ISE), Haußmann J., Dittmann K. (HZB), Arlt T. (HZB), Wieder F. (HZB/TU Berlin), Tötze C. (HZB), Klages M., Reiter C., Riesemeier H. (BAM), Scholta J., Gerteisen D. (FhG-ISE), Banhart J. (HZB/TU Berlin), Manke I. (HZB); **Visualization of the water distribution in perforated gas diffusion layers by means of synchrotron X-ray radiography**; International Journal of Hydrogen Energy, 2012

/ Musiol F.; **Erneuerbare Energien in Zahlen**; Thorsten Müller (Hg.), Schriften zum Umweltenergierecht „20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien“, Nomos Verlag, 2012

/ Musiol F.; **Perspektiven der erneuerbaren Energien**; Vorsicht Höchstspannung! – Sichere Energie für morgen; Reihe Brockhaus perspektiv, 2012

/ Musiol F., Nieder T., Rütger T., Walker M.; **Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 2011**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen (2012) Heft 10

/ Ott T. (HS Ulm), Walter T. (HS Ulm), Kiowski O., Hariskos D., Schäffler R. (Manz); **Luminescence characterizations and parameter drifts of CIGS solar cells**; Photovoltaics International Journal 16 (2012) pp. 87-92

/ Powalla M.; **Die Alternative fürs Haus – Dünnschicht-Solarmodule**; bau life 03 (2012) S. 48-50

/ Powalla M.; **CIGS-Technologie für Dünnschicht-Solarmodule**; ep Photovoltaik 5/6 (2012) S. 44-47

/ Schmid J. (IWES), Günther M. (IWES), Jentsch M. (IWES), Specht M., Waldstein G. (SolarFuel), Otten R. (Audi); **Klimaverträglich: Erneuerbares Methan**; UmweltMagazin 4/5-2012, Seite 60-63

/ Seidenberger K., Klages M., Wilhelm F., Scholta J.; **Investigations on the morphology and water inventory of GDLs using a µ-computer tomography and Monte Carlo modelling**; ECS Transactions (2012) Vol 42 (1) pp. 179-190

/ Tran H. Y., Greco G. (Univ. of Rome), Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M., Haselrieder W. (TU Braunschweig), Kwade A. (TU Braunschweig); **Influence of electrode preparation on the electrochemical performance of LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ composite electrodes for lithium-ion batteries**; Journal of Power Sources 210 (2012) 276-285

/ Varzi A., Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **The effects of pristine and carboxylated multi-walled carbon nanotubes as conductive additives on the performance of LiNi_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}O₂ and LiFePO₄ positive electrodes**; Electrochimica Acta 78 (2012) 17

/ Wischmann W.; **CIS-Dünnschichttechnologie – Neue Technologien und Verfahren zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung**; Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2011, www.forschungsjahrbuch.de, Projektträger Jülich im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2012

/ Würz R., Eicke A., Kessler F., Paetel S., Efimenko S. (PEMCO), Schlegel C. (PEMCO); **CIGS thin-film solar cells and modules on enamelled steel substrates**; Solar Energy Materials & Solar Cells 100 (2012) 132-137

/ Zhang Z. (KIT), Tang X. (KIT), Kiowski O., Hetterich M. (KIT), Lemmer U. (KIT), Powalla M., Hölscher H. (KIT); **Reevaluation of the beneficial effect of Cu(In,Ga)Se₂ grain boundaries using Kelvin probe force microscopy**; Applied Physics Letters 100 (2012) 203903

// Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

// Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

/ Abdel-Maksoud H. (WUT), Igalsen M. (WUT), Spiering S.; **Influence of post-deposition heat treatment on the electrical transport properties of In₂S₃-buffered Cu(In,Ga)Se₂ cells**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Alink R. (FhG-ISE), Haußmann J., Markötter H. (HZB), Spadinger A. (FhG-ISE), Gerteisen D. (FhG-ISE); **Investigating the water management in perforated gas diffusion layers for polymer electrolyte membrane fuel cells**; 19th World Hydrogen Energy Conference (WHEC), Toronto, 3-7 June 2012

/ Axmann P., Memm M., Köntje M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of partial substitution on lithium manganese and lithium cobalt phosphate**; 16th International Meeting on Lithium Batteries, Jeju, 17-22 June 2012

/ Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Synthesis and characterization of manganese and cobalt based lithium metal phosphates**; International Battery Association Pacific Power Source Symposium, Joint meeting 2012, Waikoloa, 9-13 Jan. 2012

/ Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **High-voltage cathode materials for lithium-ion batteries – structural and morphological effects**; 2012 MRS Fall Meeting, Boston, 26-30 Nov. 2012

/ Bauder A. (DLR), Haußmann J., Markötter H. (HZB), Alink R. (FhG-ISE), Manke I. (HZB), Scholta J., Friedrich K.A. (DLR); **Development of self-supporting MPLs for investigations of water transport in PEM fuel cells**; GDCh Electrochemistry 2012, München, 17-19 Sept. 2012

/ Bauder A. (DLR), Haußmann J., Markötter H. (HZB), Alink R. (FhG-ISE), Scholta J., Friedrich K.A. (DLR); **Influence of the MPL on PEM fuel cell performance**; 63rd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Prague, 19-24 Aug. 2012

/ Bauer A., Wahl T., Hanisch J., Ahlswede E.; **Highly efficient semitransparent solar cells with sputtered ZnO:Al cathodes: Influence of light management at the transparent electrode**; HOPV 2012, 4th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics, Uppsala, 6-9 May 2012

/ Binder J.; **Decentralized photovoltaics: Autonomy, self-consumption and reduction of grid loading through electrical and thermal storage**; PV-Konferenz der Koordinierungsstelle Erneuerbare Energien, Paris, 3 July 2012

/ Binder J., Danzer M., Späth V., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Perspectives and development of lithium ion batteries for intermediate storage of renewable energies**; Lithium Ion Batteries Symposium, Nice, 22 Oct. 2012

/ Binder J., Kelm T.; **Dezentrale Photovoltaik: Autonomie, Eigenverbrauch und Netzentlastung durch lokale Strom- und Wärmespeicher**; Tagungsband 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 29.2.-2.3.2012

// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

/ Binder J., Mohring H.-D., Danzer M., Schanz O., Schmiegel A. (voltwerk), Linhart A. (voltwerk), Landau M. (FhG-IWES), von Appen J. (FhG-IWES), Niedermeyer F. (FhG-IWES), Braun M. (FhG-IWES), Magnor D. (RWTH), Sauer D. (RWTH), Schuh H. (Saft), Thomas U. (E.ON), Martin N. (INES-CEA), Marcel J.C. (Tenesol), Jehoulet C. (Saft); **Sol-ion PV storage system: Field trial results, spread of operating conditions and performance evaluation based on field data**; Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Binder J., Schmiegel A. (voltwerk); **Experience with Li-battery based PV storage systems**; Energy Storage – Summit for the Storage of Renewable Energies, Düsseldorf, 13-14 March 2012

/ Binder J., Schmiegel A. (voltwerk), Magnor D. (RWTH), Martin N. (INES-CEA), Williams C., Mohring H.-D., Danzer M., Linhart A. (voltwerk), Sauer D. (RWTH), Landau M. (FhG-IWES), von Appen J. (FhG-IWES), Braun M. (FhG-IWES), Schuh H. (SAFT), Thomas U. (E.ON), Marcel J. (Tenesol), Jehoulet C. (SAFT); **Sol-ion PV storage system: Field trial results and implications on battery lifetime expectancy**; 7th International Renewable Energy Storage Conference, Berlin, 12-14 Nov. 2012

/ Binder J., Williams C., Kelm T.; **Increasing PV self consumption, domestic energy autonomy and grid compatibility of PV systems using heat pumps, thermal storage and battery storage**; Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Binder J., Williams C., Kelm T.; **Demand side management through battery storage to increase local self-consumption and grid compatibility of PV systems**; 5th International Conference on Integration of Renewable and Distributed Energy Resources, Berlin, 4-6 Dec. 2012

/ Bisle G., Fleischhammer M., Theil S., Döring H., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Impact of active material on the safety of lithium-ion batteries studied on different cell sizes**; IMLB 2012 – 16th International Meeting on Lithium Batteries, Jeju, 17-21 June 2012

/ Bisle G., Fleischhammer M., Theil S., Döring H., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Effect of cell size on the thermal behaviour of LiFePO₄ lithium-ion batteries**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Brellochs J., Marquard-Möllenstedt T., Steiert S., Specht M.; **Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen der AER-Biomassevergasung**; DGMK-Fachbereichstagung "Konversion von Biomassen", 19.-21.3.2012, Rotenburg a. d. Fulda

/ Brinner A.; **Wasserstoff als Sekundärenergieträger, Herstellung und Entwicklungsstand**; Wasserstoff, Sekundärenergieträger mit Zukunft, Treffpunkt Brennstoffzelle und Batterie, Stuttgart, 16.1.2012

/ Brinner A., Brellochs J., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (FhG-IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **Power-to-Gas**; 4. Österreichische Wasserstoff-konferenz, Graz, 27.9.2012

/ Brüggemann R. (Univ. Oldenburg), Schulze P. (Univ. Oldenburg), Neumann O. (Univ. Oldenburg), Witte W., Bauer G.H. (Univ. Oldenburg); **Relation between luminescence and open-circuit voltage in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Cojocar-Mirédin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Würz R., Abou-Ras D. (HZB), Raabe D. (MPIE); **Study of internal interfaces in CIGS thin-film solar cells using atom probe tomography**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Cojocar-Mirédin O. (MPIE), Schwarz T. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Würz R., Abou-Ras D. (HZB), Dietrich J. (TU Berlin), Raabe D. (MPIE); **Exploring the internal interfaces at the atomic scale in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; IFES 2012, 53rd International Field Emission Symposium, Tuscaloosa, 21-25 May 2012

/ Danzer M., Friedrich K.A. (DLR), Vetter M. (FhG-ISE), Hochloff P. (FhG-IWES), Finsterbusch M. (FZJ), Hoffmann C. (FhG-IWES), Hirnet A. (VARTA); **Neue Batteriesysteme zwischen Forschung und Anwendung**; FVEE-Jahrestagung „Zusammenarbeit von Forschung und Wirtschaft für erneuerbare Energien und Energieeffizienz“, Berlin, 16.-17.10.2012

/ Dsoke S., Tian X., Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Activated carbon electrodes treated at various temperatures and pressures: Correlations between electrochemical and morphological properties**; AABC – Advanced Automotive Batteries Europe, Mainz, 18-22 June 2012

/ Dsoke S., Tian X., Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Strategies to decrease the resistance sources on EDLCs electrodes**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Eicke A., Ciba T., Hariskos D., Menner R., Tschamber C., Witte W.; **Quantitative SNMS-Analyse von Zn(S,O)-Pufferschichten in Cu(In,Ga)Se₂-Dünnschichtsolarzellen**; AOFA 17, 17. Arbeitstagung Angewandte Oberflächen-analytik, Soest, 24.-26.9.2012

/ Enz S., Messerschmidt M., Scholta J.; **Numerical simulations of a complete PEMFC single cell with variations in current density**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Enz S., Schneider D., Schlumberger G., Scholta J.; **Experimental investigation of dynamic operating conditions associated with carbon corrosion for PEMFCs**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Fleischhammer M., Bisle G., Theil S., Döring H., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Safety of lithium ion batteries: Identification of thermal decomposition reactions of the raw cell materials up to the cell level**; 4. Symposium 2012 „Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“, Münster, 6.-7.3.2012

/ Fleischhammer M., Bisle G., Theil S., Döring H., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Safety aspects: From material to cell design**; Conference on Future Automotive Technology, TU München, 26-27 March 2012

/ Friedlmeier T., Ahlswede E., Romanyuk Y. (EMPA), Uhl A. (EMPA), Tiwari A. (EMPA), Hammerschmidt J. (TUC), Baumann R. (TUC), Sunnari A. (VTT), Kololouma T. (VTT), Cunningham A. (Xennia), Kaelin M. (Flisom), Bürkert L. (Manz), Van Genechten D. (Umicore), Stassin F. (Umicore); **Non-vacuum CIGS solar cells: NOVACIGS project update**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Gabler H.; **Energy crises, carbon dioxide, and the evolution of (human) life**; DAAD: German Alumni Expert Seminar on “Renewable Energy in South and South-East Asia”, Dhaka, 5-11 Jan. 2012

/ Gabler H.; **Electric power from the sun: PV solar energy technology – Applications, global markets, trends in research**; 2nd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology, ICDRET, Dhaka, 5-7 Jan. 2012

/ Günter C., Klee Barillas J., Stumpp S., Danzer M.; **A dynamic battery model for simulations of battery-to-grid application**; 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe Conference, Berlin, 14-17 Oct. 2012

/ Günther C., Schott B., Waldowski P. (TU Berlin), Hennings W. (IEF-STE), Danzer M.; **Scenario simulation of grid integration of electrical power train systems in existing and future energy supply structures**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Hanisch J., Wahl T., Bauer A., Schmidt C., Ahlswede E.; **Highly efficient polymer bulk heterojunction tandem solar cells with ZnO-nanoparticle-based recombination layer**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Haußmann J., Markötter H. (HZB), Alink R. (FhG-ISE), Dittmann K. (HZB), Bauder A. (DLR), Manke I. (HZB), Gerteisen D. (FhG-ISE), Scholta J.; **Investigation of gas diffusion layer perforations on the water transport in PEM fuel cells with synchrotron imaging**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Haußmann J., Markötter H. (HZB), Bauer A. (DLR), Alink R. (FhG-ISE), Klages M., Manke I. (HZB), Gerteisen D. (FhG-ISE), Scholta J.; **Improved water transport in natural and artificial pore paths of gas diffusion layer in PEM fuel cells**; World Hydrogen Energy Conference, Toronto, 3-7 June 2012

/ Hempel W., Wischmann W.; **Sodium barrier layer for high temperature CIGS solar cells**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Hoffmann A., Axmann P., Wilka M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **The process of lithium-ion cell manufacture – An overview**; Battery + Storage, Konferenz für Batterie- und Energiespeichertechnologien, Stuttgart, 8.-10.10.2012

/ Hogg B.-I., Stern R., Wilka M., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Development of methods for on line investigations of gas evolution and temperature fluctuations in lithium-ion batteries**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Igalson M. (WUT), Urbaniak A. (WUT), Zabierowski P. (WUT), Abdel-Mak-soud H. (WUT), Buffiere M. (Univ. de Nantes), Barreau N. (Univ. de Nantes), Spiering S.; **Red-blue effect in the CIGS devices revisited**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Kabza A.; **Fuel cell systems**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Kasper M., Waldmann T., Dörfner G., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cell analysis and battery forensic**; AABC – Advanced Automotive Batteries Europe, Mainz, 18-22 June 2012

/ Kaymaksiz S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electrochemical analysis of redox shuttle additives for safer li-ion batteries**; 5th International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications, Istanbul, 17-20 Sept. 2012

/ Kaymaksiz S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigation of redox shuttle additives for overcharge protection of Li-ion batteries with stationary and hydrodynamic voltammetry techniques**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Kaymaksiz S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Application of stationary and hydrodynamic voltammetry techniques to investigate redox shuttle additives for overcharge protection of li-ion batteries**; 63rd Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Prague, 19-24 Aug. 2012

/ Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Hartnig C. (Rockwood Lithium), Wietelmann U. (Rockwood Lithium); **A combined experimental and theoretical investigation on lithium chelatoborates as electrolyte components for secondary lithium-ion batteries**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Kind C. (KIT/IAC), Quintilla A., Ahlswede E., Feldmann C. (KIT/IAC); **Cu₁₁In₉ precursor-based nanoparticulate CuInSe₂ solar cells**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Klages M., Mack F. (HIU), Scholta J., Jörisen L., Zeis R. (HIU); **3-D microstructure of high temperature polymer electrolyte fuel cell electrodes**; Gordon Research Conference, Smithfield, 5-10 Aug. 2012

/ Klages M., Scholta J., Markötter H. (HZB); **Water inventory and performance effects of MPL characteristics in flow field channels**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Klages M., Scholta J., Enz S., Markötter H. (HZB); **Investigations on dynamic water transport characteristics in flow field channels using neutron imaging techniques**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Klee Barillas J., Li J., Küber P., Günther C., Danzer M.; **Emulation of battery modules and validation of battery management systems**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications

/ Klein A., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Novel continuous precursor synthesis method for cathode material on an example of manganese based layered oxides and phospho olivines**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Klein A., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Novel precursor method and characterization of Li_xMnO_3 as cathode material**; GDCh Electrochemistry 2012, München, 17-19 Sept. 2012

/ Klugius I., Miller R. (EMD Millipore), Quintilla A., Magorian Friedlmeier T., Blázquez Sánchez D., Ahlswede E., Powalla M.; **Rapid thermal processing for printed $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ solar cells**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Köntje M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigations on structure and electrochemistry of chemically partly delithiated lithium manganese phospho olivines**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Köntje M., Greco G. (Univ. of Rome), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigations of structure and electrochemistry of chemically partly delithiated lithium manganese phospho olivines**; GDCh Electrochemistry 2012, München, 17-19 Sept. 2012

/ Köntje M., Greco G. (Univ. of Rome), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Chemically partly delithiated lithium manganese phopho olivines: Investigations of lattice and atomic structure and electrochemistry**; ECS Prime Pacific Rim Meeting, Honolulu, 7-12 Oct. 2012

/ Kostetzer L. (CADFEM), Stumpp S.; **Electro-thermal battery modeling at the level of finite elements**; 16. Kongress mit Fachausstellung SIMVEC-Berechnung, Simulation und Erprobung Fahrzeugbau 2012, Baden-Baden, 20-21 Nov. 2012

/ Krug S., Auer M. (IVK), Kuthada T. (IVK), Wiedemann J. (IVK); **Complete vehicle simulation of a battery-electric vehicle**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Krug S., Kuhn R., Günther C., Klee Barillas J., Späth V., Auer M. (IVK), Wiedemann J. (IVK), Danzer M.; **Dynamic simulation of high voltage traction battery**; 12th Stuttgart International Symposium "Automotive and Engine Technology", Stuttgart, 13-14 March 2012, Bd. 2, S. 27-41

/ Lechner P.; **Performance-relevante Parameter von DS-Technologien aus Freifeldmessungen**; Tagungsband 8. Anwenderforum „Grundlagen Dünnschicht-Photovoltaik“, Bad Staffelstein, 27.-28.2.2012

/ Lechner P., Sánchez D., Geyer D., Mohring H.-D.; **Leckstrom-induzierte Degradation von DS-PV-Modulen**; Tagungsband 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 29.2.-2.3.2012

/ Lechner P., Sánchez D., Geyer D., Mohring H.-D.; **Estimation of time to PID-failure by characterisation of module leakage currents**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Lechner P., Stellbogen D., Schanz O., Haslauer A. (Schott Solar), Lundszen D. (Schott Solar), Mohring H.-D.; **Outdoor characterisation of tandem-cell modules using component cell modules**; Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Li J., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; **A comparative study on state of charge estimation algorithms of LiFePO_4 batteries used in electric vehicles**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Linssen J. (FZJ), Schulz A. (TU Berlin), Mischinger S. (TU Berlin), Maas H. (FFA), Günther C., Weinmann O. (Vattenfall), Bickert S. (FZJ), Danzer M., Hennings W. (FZJ), Lindwedel E. (Pöyry), Marker S. (TU Berlin), Schindler V. (TU Berlin), Schmidt A. (TU Berlin), Schmitz P. (FFA), Schott B., Strunz K. (TU Berlin), Waldowski P. (TU Berlin); **Grid integration of electric vehicles and effects on the energy supply**; 7th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Berlin, 12-14 Oct. 2012

/ Löffler M., Häußler F., Thaler S., Baumgart F., Feigl B., Bergbreiter C., Scholta J., Specht M., Küppers L. (Heat and Power Engineering); **Ethanol reforming 1 kW_e fuel cell system**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Mack F. (HIU), Carlsson A., Gogel V., Jörissen L.; **Katalysatortinten-Entwicklung für die MT-DMFC**; 5. Workshop AIF-Brennstoffzellenallianz, ZBT, Duisburg, 22.-23.5.2012

/ Magorian Friedlmeier T., Mantilla Perez P., Klugius I., Jackson P., Kiowski O., Ahlswede E., Powalla M.; **Optoelectronic characterization of coevaporated and low-cost CIGS solar cells, a comparison**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Markötter H. (HZB), Arlt T. (HZB), Tötze C. (HZB/TU Berlin), Dittmann K. (HZB), Krüger P., Haußmann J., Klages M., Scholta J., Alink R. (FhG-ISE), Gerteisen D. (FhG-ISE), Wippermann K. (FZJ), Riesemeier H. (BAM), Manke I. (HZB), Banhart J. (HZB/TU Berlin); **Investigation of fuel cell materials and liquid water transport by means of synchrotron imaging**; 221st ECS Meeting, Seattle, 6-10 May 2012

/ Mehen J. (Univ. Stuttgart), Nowak W. (Univ. Stuttgart), Danzer M., Döring H., Tanaka N. (DLR), Bessler W. (DLR); **Towards predicting thermal run-away of lithium-ion batteries**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Mohring H.-D., Binder J., Danzer M., Schmiegel A.U. (voltwerk), Landau M. (FhG-IWES), von Appen J. (FhG-IWES), Braun M. (FhG-IWES), Marcel J.C. (Tenesol), Martin N. (INES-CEA), Thomas U. (E.ON), Woyke W. (E.ON), Garhamer M. (E.ON), Magnor D. (ISEA RWTH Aachen), Sauer D.-U. (ISEA RWTH Aachen), Jehoulet C. (SAFT), Schuh H. (SAFT); **Erfahrungen bei der Installation und beim Betrieb von PV-Speichersystemen: Feldtest des Sol-ion Systems in Süddeutschland, Guadeloupe, Martinique und an Forschungsinstituten**; Tagungsband 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 29.2.-2.3.2012

/ Müller M. (Univ. Magdeburg), Ribbe S. (Univ. Magdeburg), Bertram F. (Univ. Magdeburg), Christen J. (Univ. Magdeburg), Witte W., Paetel S., Powalla M.; **Investigations of vertical compositional gradients in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ by highly spatially and spectrally resolved cathodoluminescence microscopy**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Neumann O. (Univ. Oldenburg), Heise S. J. (Univ. Oldenburg), Brüggemann R. (Univ. Oldenburg), Meessen M. (Univ. Oldenburg), Witte W., Hariskos D., Bauer G.H. (Univ. Oldenburg); **Correlation of surface contour, optoelectronic and spectroscopic properties of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ by SNOM and AFM**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion Kondensierte Materie (SKM), 76. Jahrestagung der DPG, Berlin, 25.-30.3.2012

/ Ott T. (HS Ulm), Walter T. (HS Ulm), Hariskos D., Kiowski O., Schäffler R. (Manz); **Accelerated ageing and contact degradation of CIGS solar cells**; Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Austin, 3-8 June 2012

/ Persson J., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electrochemical anion intercalation into graphite**; IMLB 2012 – 16th International Meeting on Lithium Batteries, Jeju, 17-21 June 2012

/ Petzl M. (HIU), Danzer M.; **Optimization of OCV measurements for lithium-ion-batteries**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Poboß N. (Univ. Stuttgart), Zieba M. (Univ. Stuttgart), Steiert S., Brellocks J., Specht M.; **Experimentelle Untersuchung der Einsetzbarkeit mineralstoffreicher Biomassesorten bei der AER-Biomassevergasung**; Energetische Biomassenutzung – Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft, Berlin, 5.11.2012

/ Powalla M.; **Kupfer-Indium-Diselenid-Technologie**; Tagungsband 8. Anwenderforum „Grundlagen Dünnschicht-Photovoltaik“, Bad Staffelstein, 27.-28.2.2012

/ Powalla M.; **Thin-film photovoltaics: Micro and nano technologies for multi megawatt energy conversion**; COMS 2012, 17th Annual Conference on Commercialization of Micro and Nano Systems, Tønsberg, 24-27 June 2012

/ Schmidt C., Wahl T., Hanisch J., Ahlswede E.; **Towards large-area solution-processed organic tandem solar cells**; 5th International Symposium Technologies for Polymer Electronics (TPE12), Rudolfstadt, 22-24 May 2012

/ Schmidt J. (IWE/KIT), Tran H. Y., Ivers-Tiffée E. (IWE/CFN/KIT), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Analysis and prediction of OCV curves of cathode blends**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Schnabel T., Löw M., Ahlswede E.; **Solution-processed $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S,Se})_4$ solar cells**; 3rd European Kesterites Workshop, Luxembourg, 22-23 Nov. 2012

/ Scholta J.; **Cooling technologies for HT PEM stacks**; HT-PEM Expert Workshop, Duisburg, 27-28 March 2012

/ Scholta J., Jörissen L., Tillmetz W.; **Platform concept for high power PEMFC stack**; f-cell 2012, Stuttgart, 8-10 Oct. 2012

/ Scholta J., Klages M., Enz S., Messerschmidt M., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB); **Investigation on dynamic water transport of PEMFCs combining neutron radiography and CFD simulation**; 2012 Fuel Cell Seminar and Exposition, Uncasville, 5-8 Nov. 2012

/ Scholta J., Klages M., Enz S., Messerschmidt M., Markötter H., Manke I.; **Investigation of dynamic water transport of PEMFCs combining neutron radiography and CFD simulation**; 2012 Fuel Cell Seminar and Exposition, Uncasville, 5-8 Nov. 2012

/ Scholta J., Messerschmidt M., Kunz D., Gogel V.; **Fortschritte bei der Entwicklung eines MT-DMFC-Stacks**; 5. Workshop AIF-Brennstoffzellenallianz, ZBT, Duisburg, 22.-23.5.2012

/ Schwarz T. (MPIE), Cojocaru-Miredin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Lämmle A., Würz R., Raabe D. (MPIE); **Characterization of grain boundaries in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin-film solar cells by atom probe tomography**; IFES 2012, 53rd International Field Emission Symposium, Tuscaloosa, 21-25 May 2012

/ Schwarz T. (MPIE), Cojocaru-Mirédin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Lämmle A., Würz R., Raabe D. (MPIE); **Atomic-scale analysis of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ grain boundaries**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Schwarz T. (MPIE), Cojocaru-Mirédin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Würz R., Raabe D. (MPIE); **Study of impurities redistribution inside the CIGS absorber layer by atom probe tomography**; PVTC 2012, Photovoltaic Technical Conference: Thin Film & Advanced Silicon Solutions, Aix-en-Provence, 6-8 June 2012

/ Seidenberger K., Wilhelm F., Scholta J.; **Grand canonical Monte Carlo study on water agglomerations with a PEMFC GDL**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Späth V., Waldenmaier D., Cornerell W. (HS Ulm), Riegel B. (Hoppecke), Müller R. (Phocos); **Hybridisierung von Lithium-Batterien in stationären Anwendungen mit fluktuierendem Betrieb (HYLIS)**; LIB 2015, Mannheim, 18.-20.4.2012

/ Späth V., Waldenmaier D., Cornerell W. (HS Ulm), Riegel B. (Hoppecke), Müller R. (Phocos); **Maximierung der Batterielebensdauer in PV-Systemen durch Batterie-Hybrid-Speicher**; 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 29.2.-2.3.2012

/ Späth V., Waldenmaier D., Cornerell W. (HS Ulm), Riegel B. (Hoppecke), Müller R. (Phocos), Nemet-Losert P. (Hoppecke), Andrä S. (HS Ulm), Schneider M. (Phocos), Danzer M.; **Maximization of battery lifetime in rural electrification with hybrid battery storages**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Specht M.; **Power-to-Gas – Speicherung erneuerbarer Energien im Erdgasnetz**; 25 Jahre ISFH, Fachsymposium „Erneuerbare Energien“, Emmertal, 29.6.2012

/ Specht M. in Kooperation mit FhG-IWES und SolarFuel GmbH; **Power-to-Gas: Speicherung erneuerbarer Energie im Erdgasnetz**; 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 29.2.-2.3.2012

// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications

/ Specht M. und Projektpartner; **Technik und Ziele der 250-kW_{el}-Power-to-Gas-Forschungsanlage**; Einweihung der 250-kW_{el}-Power-to-Gas-Anlage, ZSW-Technikum, Stuttgart, 30.10.2012

/ Specht M., Zuberbühler U., Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Frick V., Löffler M., Schwarz S., Stürmer B.; **Power-to-Gas (P2G®): Layout, operation and results of the 25 and 250 kW_{el} research plants**; Forum Power to Gas, Kongress- und Kulturzentrum St. Erhard, Regensburg, 8 Oct. 2012

/ Specht M., Zuberbühler U., Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Frick V., Löffler M., Schwarz S., Stürmer B.; **Power-to-Gas (P2G®): Layout, operation and results of the 25 and 250 kW_{el} research plants**; f-cell 2012, Session: H₂ Infrastructure + Storage, Stuttgart, 9 Oct. 2012

/ Specht M., Zuberbühler U., Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Frick V., Löffler M., Schwarz S., Stürmer B., FhG-IWES, SolarFuel GmbH; **Current status of Power-to-Gas (P2G®) technology**; 6. Biomasse-Forum: Kreislaufwirtschaftsgesetz 2015: Erfassung und hochwertige Verwertung von Bioabfall, Bad Hersfeld, 21-22 Oct. 2012

/ Spiering S., Blau N., Kessler F.; **Flexible CIGS solar cells with indium sulphide buffer**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Stumpp S., Kostetzer L. (CADFEM), Günther C., Krug S., Rudnyi E. (CADFEM), Danzer M.; **Spatially resolved electro-thermal cell model for the prediction of the heat distribution in lithium-ion pouch cells**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Stumpp S., Kostetzer L. (CADFEM), Rudnyi E. (CADFEM), Kellermeyer M. (CADFEM), Danzer M., Kuhn R.; **Evaluation of the influence of thermal model details for lithium-ion pouch cells**; 4. Symposium 2012 „Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“, Münster, 6.-7.3.2012

/ Stumpp S., Kostetzer L. (CADFEM), Rudnyi E. (CADFEM), Kellermeyer M. (CADFEM), Kuhn R., Danzer M.; **Evaluation of thermal modelling approaches for lithium-ion pouch cells**; Advanced Battery Power 2012, Münster, 6-7 March 2012

/ Sun S. (Univ. Ulm), Jusys Z. (Univ. Ulm), Jäger A., Gogel V., Jörisen L., Behm R. (Univ. Ulm); **Electrooxidation of borohydride on a Pt-Au/C catalysts in alkaline medium: model and fuel cell studies**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Theil S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigations on electrolyte decomposition during aging via headspace GC-MS**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Tian X., Dsoke S., Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigation on improving the electrical contact between carbon material and current collector for electrochemical double layer supercapacitors**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Tost A., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **In-situ and ex-situ Raman study on NMC cathodes**; ABAA2012 – 5th International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications, Istanbul, 17-20 Sept. 2012

/ Tschamber C., Eicke A., Ciba T., Botros M., Hariskos D., Menner R., Witte W.; **Characterisation of sputtered Zn(S,O) buffer layers for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Uhl A. (EMPA), Wallerand A. (EMPA), Koller M. (EMPA), Fella C. (EMPA), Romanyuk Y. (EMPA), Tiwari A. N. (EMPA), Friedlmeier T., Ahlswede E., Van Genechten D. (Umicore), Stassin F. (Umicore); **Selenization of nanoparticle precursor layers for Cu(In,Ga)Se₂ absorbers**; Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012

/ Wachtler M., Kaymaksiz S., Hess S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Improving safety of Li-ion batteries with redox-shuttle electrolyte additives prospects and limits**; ILED 3 – International Conference on Ionic Liquids for Electrochemical Devices, Rome, 30 May - 1 June 2012

/ Wachtler M., Kaymaksiz S., Wilhelm F., Hess S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Improving safety of lithium-ion batteries with redox-shuttle electrolyte additives – prospects and limits**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Wachtler M., König M., Kasper M., Fleischhammer M., Emmermacher B., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Post-mortem analysis of graphite / NMC Li-ion cells aged at different cycling and storage conditions**; IMLB 2012 – 16th International Meeting on Lithium Batteries, Jeju, 17-21 June 2012

/ Wachtler M., König M., Kasper M., Fleischhammer M., Emmermacher B., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cycle and calendar life study of a graphite/NMC-based Li-ion high-energy system, Part B: Post-mortem analyses**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Waldmann T., Kasper M., Arnold G., Dörfner G., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Zellalterung im ReLiOn-Projekt**; LIB 2015, Mannheim, 18.-20.4.2012

/ Waldmann T., Kasper M., Dörfner G., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cell aging analysis and battery forensic**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Wilhelm F., Seidenberger K., Haußmann J., Scholta J., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB); **Employing Monte Carlo simulation techniques to study water agglomerations within PEMFC GDLs**; 6th Japanese-Italian-German Meeting of Electrochemists, Ulm, 5-7 July 2012

/ Wilka M., Hoffmann A., Stern R., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Process development on pilot line for lithium-ion batteries**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Wilka M., Hoffmann A., Stern R., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Development of 18650 lithium-ion cells with new active materials**; 13th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 3-5 July 2012

/ Wilka M., Hoffmann A., Stern R., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of anode/cathode balancing on cycling stability of lithium ion cells**; ECS Prime Pacific Rim Meeting, Honolulu, 7-12 Oct. 2012

/ Wilka M., Hoffmann A., Stern R., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Process optimisation by the application of cylindrical cells (18650) and pouch cells with reference electrodes**; ECS Prime Pacific Rim Meeting, Honolulu, 7-12 Oct. 2012

/ Wilka M., Stern R., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Reference electrode measurements inside round cells (18650) and pouch cells**; Advanced Automotive Batteries, Orlando, 6-10 Feb. 2012

/ Williams C., Binder J., Kelm T.; **Demand side management through heat pumps, thermal storage and battery storage to increase local self-consumption and grid compatibility of PV systems**; 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe Conference, Berlin, 14-17 Oct. 2012

/ Witte W., Abou-Ras D. (HZB), Hariskos D.; **Influence of Cu(In,Ga)Se₂ grain orientation on solution growth of Zn(O,S) and CdS**; Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Austin, 3-8 June 2012

/ Witte W., Hariskos D., Eicke A., Menner R., Kiowski O., Powalla M.; **Impact of annealing on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with Zn(O,S)/(Zn,Mg)O buffers**; E-MRS 2012 Spring Meeting, Strasbourg, 14-18 May 2012

/ Witte W., Powalla M., Hariskos D., Eicke A., Botros M., Schock H.-W. (HZB), Abou-Ras D. (HZB), Mainz R. (HZB), Rodriguez-Alvarez H. (HZB), Unold T. (HZB), Bauer G. (Univ. Oldenb.), Brüggemann R. (Univ. Oldenb.), Heise S. (Univ. Oldenb.), Neumann O. (Univ. Oldenb.), Meessen M. (Univ. Oldenb.), Christen J. (Univ. Magdeb.), Bertram F. (Univ. Magdeb.), Müller M. (Univ. Magdeb.), Klein A. (TU Darmstadt), Adler T. (TU Darmstadt), Albe K. (TU Darmstadt), Pohl J. (TU Darmstadt), Martin M. (RWTH Aachen), De Souza R. (RWTH Aachen), Nagarajan L. (RWTH Aachen), Beckers T. (RWTH Aachen), Boit C. (TU Berlin), Dietrich J. (TU Berlin), Hetterich M. (KIT), Zhang Z. (KIT), Scheer R. (KIT), Krempa H. (Univ. Halle), Orgis T. (Univ. Halle); **Chemical gradients in Cu(In,Ga)(S,Se)₂ thin-film solar cells: Results of the GRACIS project**; Proceedings of the 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Frankfurt, 24-28 Sept. 2012, pp. 2166-2173

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Elektrochemische Energiespeicherung für stationäre Zwischenspeicherung – Konzepte und Perspektiven**; 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 29.2.-2.3.2012

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electric energy storage systems for automotive applications**; Tage des Hybrids, IKA Aachen, 22.-23.5.2012

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Redox-shuttle electrolyte additives for lithium ion batteries – Prospects and limits**; 6th Japanese-Italian-German Meeting of Electrochemists, Ulm, 5-7 July 2012

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Advanced positive materials for lithium ion batteries**; 18th International Conference on Ternary and Multinary Compounds, Salzburg, 27-31 Aug. 2012

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Advanced positive materials for lithium ion batteries**; Lithium-Ion Symposium, Rome, 28 Sept. 2012

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Li-Ionen-Batterien: Vom Material zur Zelle, Stand der Technik und Perspektiven**; Battery + Storage, Konferenz für Batterie- und Energiespeichertechnologien, Stuttgart, 8.-10.10.2012

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Research on battery and storage technology at ZSW Baden-Württemberg**; Joint Scientific Symposium on Electrochemistry, Shanghai University, 16 Oct. 2012

/ Zhang Z. (KIT), Witte W., Kiowski O., Lemmer U. (KIT), Powalla M., Hölscher H. (KIT); **Influence of the Ga content on the optical and electrical properties of CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ thin-film solar cells**; Proceedings of the 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Austin, 3-8 June 2012

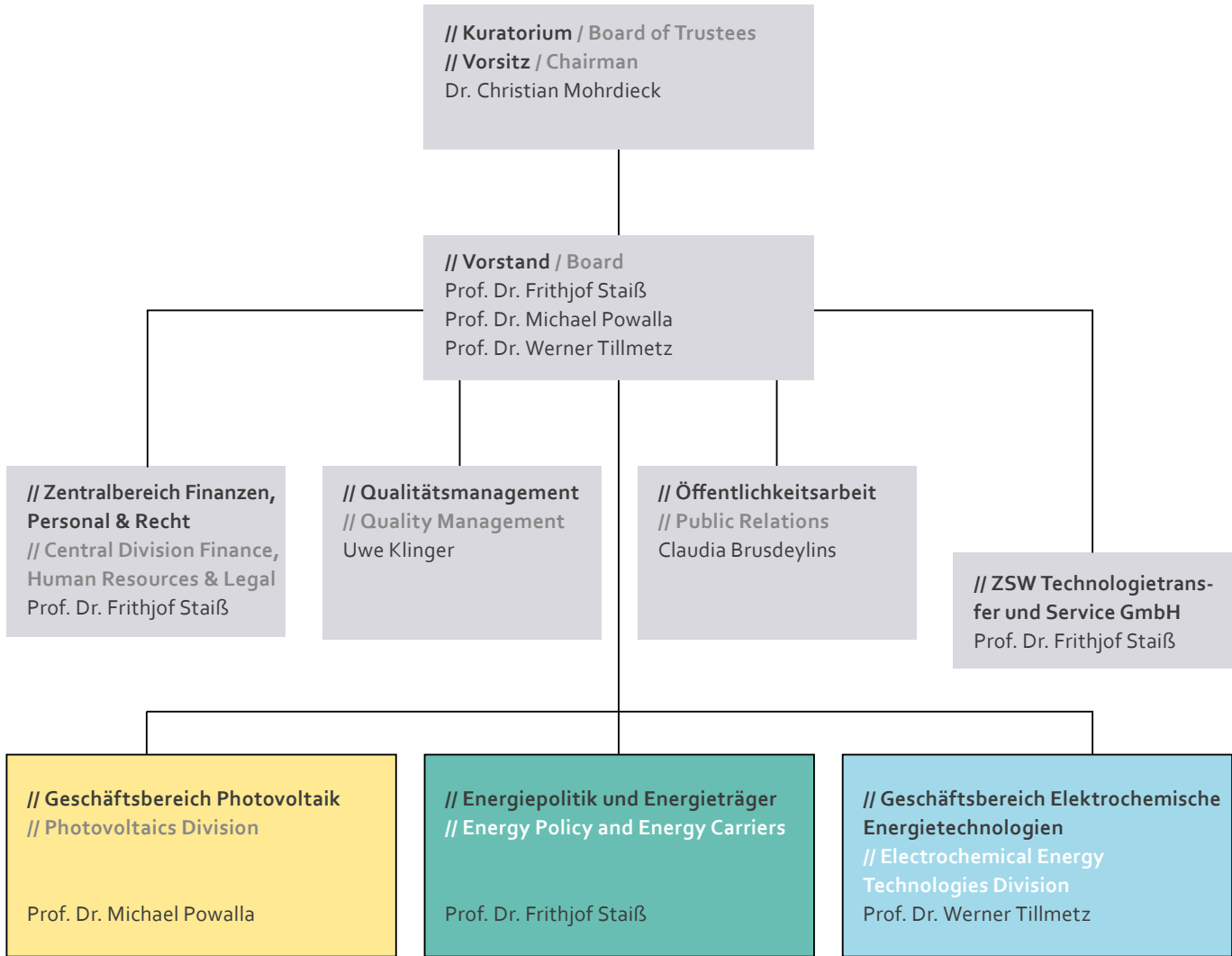
/ Zuberbühler U., Specht M., Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Frick V., Löffler M., Schwarz S., Stürmer B.; **Power-to-Gas (P2G®): Chancen für künftige Energieversorgung und Mobilität**; Neue Instrumente der Energieeffizienz, EnBW, Waldaupark, Stuttgart, 12.10.2012

/ Zuberbühler U., Specht M., Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Frick V., Löffler M., Schwarz S., Stürmer B.; **Power-to-Gas (P2G®): Construction and start-up of a 250 kW_{el} research plant**; 7th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Session: G3 Power to Gas, Berlin, 12-14 Oct. 2012

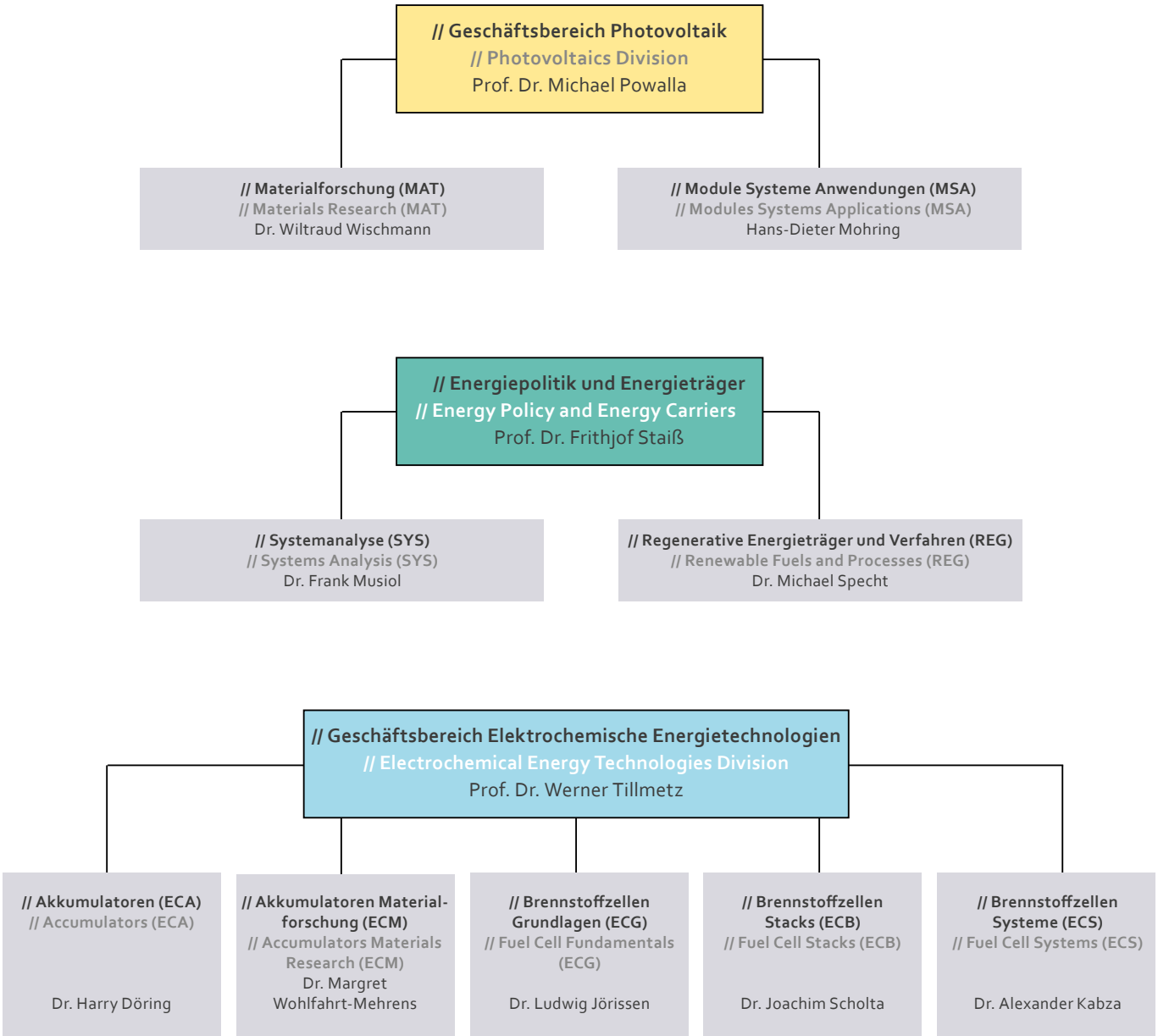
// Organigramme

Organisational Charts

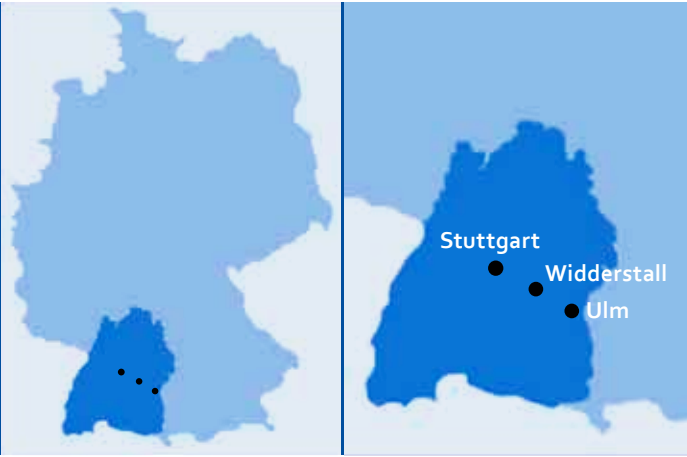
// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart



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



// Standorte
Locations



// Stuttgart



Industriestraße 6
70565 Stuttgart

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

// Widderstall



Widderstall 14
89188 Merklingen

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

// Ulm



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

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

// Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

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

// Abkürzungen

Abbreviations

// Firmen, Institute, Institutionen

// Companies, Institutes, Institutions

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AiF	Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungseinrichtungen
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung
BIRA	Belgian Institute for Space Aeronomy
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CFN	Center for Functional Nanostructures
DAAD	Deutscher Akademischer Austauschdienst
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DPG	Deutsche Physikalische Gesellschaft
ECS	Electrochemical Society
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
FFA	Ford Forschungszentrum Aachen GmbH
FhG-ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
FhG-IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
HIU	Helmholtz-Institut Ulm
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEF-STE	Institut für Energieforschung, Systemforschung und Technologische Entwicklung
IFW	Institut für Festkörper- und Werkstoff-Forschung
IKA	Institut für Kraftfahrzeuge Universität Aachen
ILV	Institut Lavoisier de Verdun
INES	Institut National de l'Énergie Solaire
INL	International Iberian Nanotechnology Laboratory
IOM	Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung
IRDEP	Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISEA	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe
ISFH	Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
IWE	Institut für Werkstoffe der Elektrotechnik
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
IZES	Institut für Zukunfts-Energiesysteme
KEA	Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien
MPIE	Max-Planck-Institut für Eisenforschung
MRS	Materials Research Society
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

TUC	Technische Universität Chemnitz
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDMA	Verband der Maschinen- und Anlagenbauer e. V.
VTT	Technical Research Centre of Finland
WERes	Würth Elektronik Research GmbH
WS	Würth Solar
WUT	Warsaw University of Technology
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik
ZEW	Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH

// Technische Begriffe

// Technical Terms

AC	Alternating Current / Wechselstrom
AER	Absorption-Enhanced Reforming
AFM	Atomic Force Microscope / Rasterkraftmikroskop
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCGT	Combined Cycle Gas Turbine
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHP	Combined Heat and Power
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CZTS	copper zinc tin sulfur / Kupfer-Zink-Zinnsulfid
DC	Direct Current/Gleichstrom
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
EDLC	Electric double-layer capacitors
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
F&E	Forschung und Entwicklung
GDL	Gas Diffusion Layer / Gasverteilerschicht
GDOES	Glow discharge optical emission spectroscopy / Optische Glimmentladungsspektroskopie
GuD	Gas und Dampf
HT	High-temperature / Hochtemperatur
MPL	Micro Porous Layer
MSE	Medium-sized enterprises
MT	Medium-temperature / Mitteltemperatur
NNORSY	Neural Network Ozone Retrieval System
OCV	Open-Circuit Voltage
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PID	Potential-induced degradation / Potenzialinduzierte Degradation
PV	Photovoltaik
R&D	Research and Development
SNMS	Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie/ Secondary Neutral Mass Spectrometry
SNOM	Scanning near-field optical microscopy / Optische Rasternahfeldmikroskopie
SOC	State of Charge – Ladungszustand
TCO	Transparent Conductive Oxide
µ-CT	Mikro-Computertomographie

// Mitgliedschaften

// ZSW is a member of



EUREC	European Renewable Energy Centres Agency
ZfES	Zentrum für Energieforschung an der Universität Stuttgart
Kinet	Kompetenz- und Innovationszentrum Nachhaltige Energie-Technik Windcluster BW e.V.
EWEA	European Wind Energy Association
WindforS	Windenergie Forschungsnetzwerk Süd
DVG	Deutsche Vakuum-Gesellschaft
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V.
DGMK	Dt. Wissenschaftl. Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien
AKK	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft
BBA-BW	Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
DWV	Deutscher-Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband
ECS	Elektrochemical Society
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
N.ERGHY	New European Research Grouping (c/o DLR)
WBZU	Weiterbildungszentrum Ulm für Innovative Energietechnologien e.V.

// 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
Internet: www.zsw-bw.de

// Redaktion Editors

Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Gudrun Scherg
Ulrike Zimmer

// Koordination Coordination

Karl-Heinz Frietsch

// Layout & Satz Layout & Setting

Sieber & Wolf Werbeagentur
Hofgut Mauer 1
70825 Korntal-Münchingen
www.sieberundwolf.de



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

Stuttgart:

Industriestraße 6
70565 Stuttgart
Fon: +49 (0) 711 78 70-0
Fax: +49 (0) 711 78 70-100
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

Ulm:

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Fon: +49 (0) 731 95 30-0
Fax: +49 (0) 731 95 30-666
www.zsw-bw.de

Ulm eLaB:

Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
Fon: +49 (0) 731 95 30-500
Fax: +49 (0) 731 95 30-599
www.zsw-bw.de



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