

// ERGEBNISSE
RESULTS

2010

// ZSW ist Mitglied im
// ZSW is a member of



// 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.

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Stiftung / Foundation
5	Mitglieder des ZSW-Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
6	Meilensteine / Milestones
12	Schwerpunktbericht 2010: Auf dem Weg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien Focus Report 2010: Approaching the Age of Renewable Energy
26	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
28	Systemanalyse / Systems Analysis
32	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
38	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
40	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
44	Akkumulatoren / Accumulators
48	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
52	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
54	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
58	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
60	Organisation und Verwaltung / Organisation and Administration
61	Werkstätten, IT und Bauleitung / Workshops, IT and Construction Management
62	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
68	Dokumentation / Documentation
70	Haushaltsentwicklung / Budget Development
72	Personalentwicklung / Staff Development
74	Veröffentlichungen / Publications
80	Organigramm / Organisational Chart
82	Standorte / Locations
84	Abkürzungen / Abbreviations
85	Impressum / Imprint



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Prof. Dr. Michael Powalla

//Vorwort

Foreword

Mit ihrem im September 2010 vorgelegten Energiekonzept hat die Bundesregierung erstmalig eine politische Langfristkonzeption vorgelegt und damit unterstrichen, dass eine an den Prinzipien der Nachhaltigkeit ausgerichtete Energieversorgung in Zukunft vor allem eines erreichen muss: mehr Energieeffizienz und mehr erneuerbare Energien. Dies sind zwei Seiten einer Medaille. Bis 2050 soll der Energiebedarf in Deutschland in etwa halbiert werden und der Beitrag der Erneuerbaren auf 60% zunehmen, im Strommarkt sogar auf 80%. Das Jahr 2010 war aber auch das Jahr, in dem auf kommunaler, regionaler und nationaler Ebene weitergehende Untersuchungen vorgestellt wurden, die zeigen, wie eine regenerative Vollversorgung aussehen kann.

Damit erleben wir einen Paradigmenwechsel: Ging es in der Vergangenheit primär darum, erneuerbare Energien zu einer sichtbaren Größe in der Energielandschaft zu entwickeln, so gilt es nun, das Gesamtsystem zukunftsfähig zu gestalten. Dies trifft besonders auf die Stromversorgung zu: Hier müssen die Erzeugung aus erneuerbaren und konventionellen Quellen, die Stromnachfrage und Infrastrukturen neu aufeinander abgestimmt und die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr besser miteinander vernetzt werden.

Diese Transformation des Energiesystems bildet den Themenschwerpunkt des vorliegenden Jahresberichtes. Das ZSW trägt konzeptionell und vor allem technologisch dazu bei, die anstehenden Herausforderungen zu bewältigen. Zu den Meilensteinen zählen 2010 der Weltrekord für Dünnschicht-Solarzellen, der Innovationspreis der deutschen Gaswirtschaft für unser „Power-to-Gas“-Konzept und der Ausbau der Batterieforschung mit dem neuen Institutsgebäude eLaB.

Bei der inhaltlichen und räumlichen Erweiterung des Instituts haben wir von vielen Seiten sehr nachhaltige Unterstützung erfahren. Unser Dank dafür gilt der Landesregierung Baden-Württemberg, den Bundesministerien für Umwelt, für Forschung, für Verkehr und für Wirtschaft sowie der Europäischen Union, unseren Partnern aus Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen sowie den Mitgliedern des Kuratoriums mit seinem Vorsitzenden, Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht. Ganz besonders danken möchten wir jedoch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ZSW, deren hervorragende und engagierte Arbeit für unseren gemeinsamen Erfolg in dieser außerordentlich dynamischen Entwicklungsphase entscheidend ist.

The energy concept presented by the German Federal Government in September 2010 is the first to contain a long-term policy blueprint, one that underlines the primary goals that future energy supplies based on the principles of sustainability must achieve: more energy efficiency and more renewable energy. These goals describe two sides of the same coin. The plan is to roughly halve Germany's energy requirements by 2050 while increasing the proportion of renewables to 60% – in the electricity sector even to 80%. Furthermore, 2010 was also the year in which more extensive studies were presented at the local, regional and national levels, showing what a 100% renewable energy supply can look like.

We are thus experiencing a paradigm shift. Whereas in the past, the primary concern was to develop renewable energy sources to become a recognisable factor in the energy landscape, the main aim now is to give shape to the entire system for a sustainable future. Especially the electricity sector must transform to align the generation from renewable and conventional sources, the electricity demand, and infrastructures with one another and also networks between the electricity, heating and transport sectors must be improved.

This transformation of the energy system forms the focus of this annual report. ZSW is making a conceptual and, in particular, technological contribution to meeting the challenges ahead. Milestones in 2010 included the world record for thin-film solar cells, the German gas industry's innovation award for our "Power to Gas" concept, and the expansion of battery research with the new institute building eLaB.

We have enjoyed sustained support from many quarters in expanding the institute with regard to both science and space. For this, we would like to thank the Federal State of Baden-Württemberg, Germany's Federal Ministries of Environment, Research, Transport and Economics, the European Union, our partners from companies and scientific institutes, as well as the Board of Trustees with its Chairman, Professor Hans Albrecht. Last but not least, we would like to thank the staff at ZSW, whose excellent and committed work has been decisive for our mutual success during this extraordinarily dynamic development phase.



// Stiftung Foundation

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

Stiftungszweck ist:

„Forschung und Entwicklung im Bereich 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.“
(Satzung vom 16. März 1988)

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 solar energy and hydrogen technology in cooperation with academic and applied research and by transferring the results into industrial application.”

(Statutes of March 16, 1988)

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 ZSW-Kuratoriums

Members of the Board of Trustees

Vorsitzender / Chairman

- > Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht

Stellvertreter / Vice Chairman

- > Dr. Ulrich Alkemade

Ministerien / Ministries

- > Ministerialrätin Susanne Ahmed, Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
- > Ministerialrat Stefan Gloger, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- > Ministerialrat Dr. Frank Güntert, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg
- > Regierungsdirektor Karl Wollin, Bundesministerium für Bildung und Forschung

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 Energie

Fraunhofer-Gesellschaft

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

Wissenschaft / Science

- > Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht
- > Prof. Dr. Achim Bubenzer, Rektor der Hochschule Ulm
- > Prof. Dr. Uli Lemmer, Universität Karlsruhe
- > Prof. Dr. Johann Löhn, Präsident der Steinbeis-Hochschule Berlin

Wirtschaft / Commercial enterprises

- > Dr. Ulrich Alkemade, Robert Bosch GmbH
- > Rolf Bauer, Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Dipl.-Oec. Matthias Berz, Stadtwerke Ulm / Neu-Ulm
- > Dipl.-Ing. Peter Heinrich, Fichtner GmbH & Co. KG
- > Dr. Christian Mohrdieck, Daimler AG
- > Dr. Wolfram Münch, EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- > Dr. Günter von Au, Süd-Chemie AG





// Meilensteine 2010
Milestones 2010

// Meilensteine ZSW 2010

Milestones ZSW 2010

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung deutlich zu erhöhen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch den Transfer neuer und verbesserter Energietechnologien in den Markt. So wurden auch 2010 wieder herausragende Ergebnisse in allen Themenschwerpunkten erzielt.

Die Meilensteine zeigen die wichtigsten Ergebnisse in kompakter Form.

“Energy with a future” describes the goal of considerably increasing the proportion of renewable energy sources used to supply energy. ZSW is pursuing this objective by transferring new and improved energy technologies to the market, whereby excellent results were also achieved in 2010 in all core topic areas.

The milestones show the most important results in a compact form.

// Bessere Qualifizierung von Dünnschicht-Modulen: ZSW eröffnet Solab in Stuttgart

Genauere und effizientere Messverfahren für die boomende Dünnschicht-Photovoltaik stellt das ZSW in seinem erweiterten Dünnschicht-Testlabor „Solab“ zur Verfügung. Mit Sonnensimulation, Vorbeleuchtung, Klima- und Belastungstests entwickeln die Forscher gemeinsam mit der Solarindustrie grundlegende Messverfahren, die an die spezifischen Erfordernisse der Dünnschichttechniken angepasst sind.

Die Verfahren und die einzigartige materialwissenschaftliche Kompetenz am Institut unterstützen Modulhersteller bei der Entwicklung von Dünnschicht-Solarzellen mit mehr Leistung und Lebensdauer. Gerade die Verknüpfung von exakten Freifeldmessungen auf Modul- und Systemebene mit beschleunigten Alterungstests im Labor, in dem jetzt auch Großmodule bis zu einer Diagonale von 3,4 m getestet werden können, wird für Produzenten und Betreiber die Vorhersagbarkeit der Erträge verbessern. Am 2. Februar wurde das Testzentrum mit einem Fachkolloquium mit Vertretern der europäischen Solarforschung und -industrie eröffnet.

// Improved characterisation of thin-film modules: ZSW opens Solab in Stuttgart

ZSW is providing more precise and efficient measurement procedures for the booming thin-film photovoltaic industry in “Solab”, its expanded thin-film test laboratory. In conjunction with the solar power industry, the researchers are developing fundamental measurement procedures, including solar simulations, pre-lighting, climate and loading tests, which are adapted to the specific requirements of thin-film technology.

Module manufacturers are using these procedures and the unique scientific materials research at the institute for developing thin-film solar cells that achieve greater performance and a longer service life. Particularly the combination of precise field measurements at the module and system level with accelerated ageing tests in the laboratory, where large-format modules with 3.4 m diagonals can also now be tested, will improve the ability of producers and operators to forecast yields. The test centre was officially opened on 2 February with an expert colloquium that included European solar research and industry representatives.



// Mitarbeiter des Solab erläutern die neuen Modultestmöglichkeiten am ZSW.
// Solab staff explain ZSW's new module testing possibilities.





// Neubau mit 6.600 m² für die Batterieforschung in Ulm

Am Standort Ulm entsteht bis Sommer 2011 ein 6.600 m² großes Labor für die Batterieforschung (eLaB). Es besteht aus einem Testfeld mit mehreren Sicherheitstestkammern und 20 Testkabinen mit Klimatisierung und ausgefeilter Messtechnik. Ein weiteres Highlight ist der Aufbau umfassender Testeinrichtungen für komplette Batteriesysteme mit Fragestellungen zu Batteriemangement, Ladezustandsbestimmung, Fehlerdiagnose und Thermalhaushalt. Für Hersteller von Aktivmaterialien oder Batterien stellt das neue Zentrum ein ideales Umfeld für die Materialentwicklung und Evaluierung neuer Komponenten und Mixturen in industriellen Standardzellen dar. Damit können verschiedenste Materialkonzepte unter anwendungsnahen Bedingungen untersucht werden, ohne laufende Produktionsanlagen beim Batteriehersteller zu blockieren.

// Batterien für die E-Mobilität made in Germany

Als erstem europäischem Forschungsinstitut ist es dem ZSW gelungen, den kompletten Herstellungsprozess von Lithium-Ionen-Batterien abzubilden. Bei den gefertigten Lithium-Ionen-Zellen aus dem ZSW handelt es sich um den Standardtyp 18650 mit neuer Zellchemie. Die Zellen sind belastbar und zeigen eine sehr gute Stabilität. Der ZSW-Erfolg, alle Produktionsschritte bei der Herstellung von Lithium-Ionen-Akkus zu demonstrieren, ist ein wichtiger Baustein für die kommende Industrialisierung von Fahrzeugbatterien.

// New building with 6,600 m² for battery research in Ulm

A new 6.600 m² sized lab for battery research (eLaB) will be created until summer of 2011 in Ulm. A test field is being created with several safety test chambers and 20 test cabins with air-conditioning and sophisticated measurement technology. A further highlight is the construction of comprehensive testing devices for complete battery systems concerned with battery management, battery state-of-charge determination, error diagnoses and the thermal budget. For manufacturers of active materials and batteries, the new centre provides an ideal environment for developing materials and evaluating new components and mixtures in industrial standard cells. This enables a diverse range of material concepts to be investigated under application-based conditions without blocking running production plants at the battery manufacturer.

// Batteries for e-mobility made in Germany

ZSW is the first European research institute to have successfully reproduced the complete manufacturing process for lithium-ion batteries. ZSW's lithium-ion cells are standard 18650 types. The cells are durable and show very good stability. ZSW's success in demonstrating all production stages required for manufacturing lithium-ion accumulators is an important milestone for the future industrialisation of vehicle batteries in Germany.



// Neubau des ZSW-Labors für Batterietechnologie eLaB.

// New building of the ZSW Laboratory for Battery Technology eLaB.

// Meilensteine ZSW 2010

Milestones ZSW 2010

// Neue Professur für Dünnschicht-Photovoltaik am KIT

Im Oktober berief das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) den Vorstand und Leiter des Geschäftsbereichs Photovoltaik am ZSW in Stuttgart, Dr. Michael Powalla, auf die neu geschaffene Professur für Dünnschicht-Photovoltaik nach dem Jülicher Modell. Sie ist der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik zugeordnet und eng mit dem Lichttechnischen Institut (LTI) verbunden. Mit dem ZSW-Forscher wird die seit Jahren bestehende Kooperation zwischen dem ZSW und dem KIT weiter ausgebaut. Während das KIT mit der Berufung seine Kompetenzen in der Solarforschung erweitert, sichert sich die angewandte Forschung am ZSW durch die Nähe zur KIT-Grundlagenforschung weitere neue Themen mit hohem Potenzial für die Unternehmen. Dr. Michael Powalla bietet neben der bereits bestehenden Sommersemester-Vorlesung zur Photovoltaik jetzt auch ein Seminar zu „Aktuellen Fragen der Solarenergieforschung“ im Wintersemester an.

// Rekordzellen für die Dünnschicht-Photovoltaik

Das ZSW bleibt auf Rekordkurs: Nach dem Europarekord 2009, bei dem unsere Forscher auf einer industrienahen Durchlaufanlage einen Wirkungsgrad von 19,6 % erzielten, gelang 2010 auf einer Laboranlage in einem Simultanverdampfungsprozess auf einer Fläche von 0,5 cm² ein weiterer Weltrekord mit 20,3 %. Mit dieser Bestleistung minimiert das ZSW den Vorsprung der auf dem Markt dominanten multikristallinen Solarzellen auf nur noch 0,1 %. Die stetig steigenden Wirkungsgrade im Labor lassen erwarten, dass sich der Gesamtwirkungsgrad der auf dem Markt erhältlichen, relativ preisgünstigen CIGS-Dünnschicht-Solarmodule in den nächsten Jahren von derzeit rund 12 % auf rund 15 % steigern lässt.

// New professor for thin-film photovoltaics at KIT

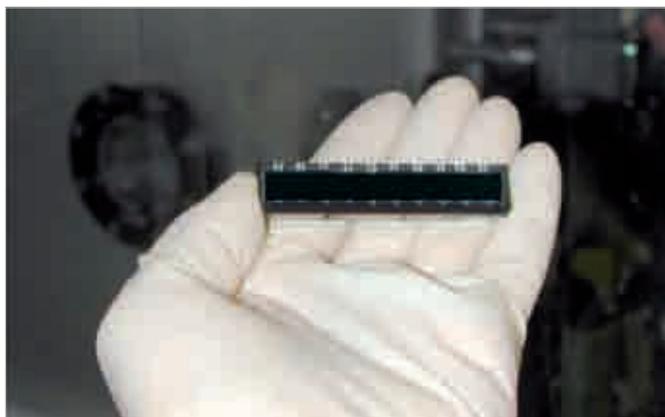
In October, the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) appointed the Member of the Board and Head of the Photovoltaics Division at ZSW in Stuttgart, Dr Michael Powalla, to the newly created post of professor for thin-film photovoltaics in accordance with the Jülich model. The new professor is assigned to the Faculty for Electrical Engineering and Information Technology, and will also work closely with the Light Technology Institute (LTI). With the ZSW researcher, the long-standing cooperation between ZSW and KIT will be further expanded. Whereas the appointment enables KIT to expand its solar research expertise, the proximity to KIT's basic research enables the applied research at ZSW to secure further new topic areas with considerable potential for the company. In addition to his already existing summer semester lectures on photovoltaics, Dr Michael Powalla is now offering a seminar on "current issues in solar energy research" in the winter semester.

// Record cells for thin-film photovoltaics

ZSW remains on record course: After breaking the European record in 2009, when our researchers achieved an efficiency of 19.6% with an industrial-scale throughput system, in 2010, we set a world record of 20.3% on a 0.5 cm² surface area with a laboratory system that utilises a simultaneous evaporation process. With its best-ever performance, ZSW has closed the gap behind the market-dominating multicrystalline solar cells to just 0.1%. The continuously increasing efficiencies in the laboratory suggest that the overall efficiency of the relatively cheap CIGS thin-film solar modules available on the market will increase in the next few years from currently 11–12% to around 15%.



// KIT-Präsident Prof. Horst Hippler übergibt Michael Powalla die Ernennungsurkunde für die neue Professur für Dünnschicht-Photovoltaik.
// KIT's president Prof Horst Hippler presents the certificate of appointment to Michael Powalla, who is the new professor for thin-film photovoltaics.



// Weltrekordzelle mit Wirkungsgrad von 20,3 % aus dem ZSW-Labor.
// World-record cell with an efficiency of 20.3% from the ZSW laboratory.



// 20.000 Stunden „Brennstoffzellen-Dauerlauf“

Im Auftrag eines Projektpartners wurde ein vom ZSW entwickeltes Stackdesign hinsichtlich seiner Lebensdauer getestet und die Leistung weiter optimiert. Seit knapp drei Jahren wurde deshalb ein Brennstoffzellen-Stack rund um die Uhr mit einem realen Lastprofil und realer Brenngas-Zusammensetzung für stationäre Anwendungen im Testzentrum betrieben. Ende 2010 ist der 20.000-Stunden-Dauerlauf erfolgreich abgeschlossen worden. Unsere Erfahrung mit der Optimierung von Stackdesigns, kombiniert mit einer leistungsfähigen Brennstoffzellen-Testinfrastruktur, liefert so erstmalig wertvolle Resultate zum Langzeit-Betriebsverhalten von Brennstoffzellen.

// Fuel cells continually run for 20,000 hours

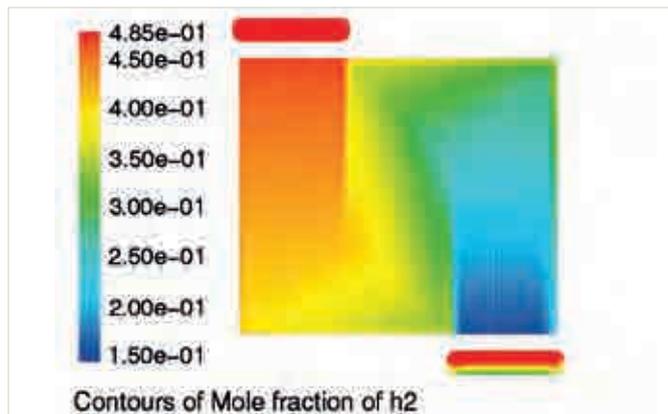
On behalf of a project partner, a stack design developed by ZSW was tested in terms of its service life and further optimised in terms of its performance. For this reason, a stack was subjected to a 24/7 test run with a real load profile for stationary applications for almost three years. The 20,000-hour continual operation was successfully concluded at the end of 2010. Our experience on optimising stack design, combined with a powerful fuel cell test infrastructure, has therefore for the first time delivered valuable results on the long-term operating behaviour of fuel cells.

// Preis der deutschen Gaswirtschaft für Innovation und Klimaschutz 2010

Der Preis für Innovation und Klimaschutz der deutschen Gaswirtschaft ging im Jahr 2010 an die Firma SolarFuel GmbH zusammen mit den Projektpartnern ZSW und Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) für das „Power-to-Gas“-Konzept. Bei dieser Technologie werden Wasserelektrolyse und Methanisierung kombiniert, um fluktuierend anfallende Strommengen aus erneuerbaren Energien im Erdgasnetz speichern zu können (siehe S. 43). Die Vergabe des Preises erfolgte durch die Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE), die den Preis gemeinsam mit dem ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobilclub e.V.), dem BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) und der dena (Deutsche Energie-Agentur GmbH) ausgelobt hat. SolarFuel und IWES sind Kooperationspartner des ZSW. Das IWES beschäftigt sich mit der Netzeinbindung und Netzregelung, das ZSW ist für die Prozessentwicklung verantwortlich, SolarFuel strebt die Kommerzialisierung der Power-to-Gas-Technologie an.

// German gas industry’s 2010 award for innovation and climate protection

In 2010, the German gas industry’s prize for innovation and climate protection was awarded to SolarFuel GmbH together with its project partners, the Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (ZSW) and the Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES), for the “Power-to-Gas” concept. The prize was awarded by the German Association for the Efficient and Environmentally Friendly Use of Energy (ASUE), which confers the award in conjunction with the German Automobile Association (ADAC), the Federal Association of German Gas and Water Industries (BDEW) and the German Energy Agency (dena). SolarFuel and IWES are ZSW cooperation partners. IWES deals with grid connections and control, ZSW is responsible for the process development, whilst SolarFuel is aiming to commercialise the Power-to-Gas technology.



// Lebensdauersteigerung durch Optimierung der Wasserstoffkonzentrationsverteilung in einem Brennstoffzellen-Flowfield.

// Improved durability by optimisation of the distribution of the hydrogen concentration in a fuel cell flowfield.





// Schwerpunktbericht 2010

Focus Report 2010

Auf dem Weg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien

Approaching the Age of Renewable Energy



// Schwerpunktbericht 2010

Focus Report 2010

Auf dem Weg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien

Approaching the Age of Renewable Energy

// FOCUS

// 2010 – Jahr der Zielsetzungen für erneuerbare Energien

Für die erneuerbaren Energien war 2010 das Jahr weitreichender Zielsetzungen. Entsprechend der bereits im Vorjahr in Kraft getretenen EU-Richtlinie, die Deutschland verpflichtet, bis zum Jahr 2020 18 % seines Bruttoendenergieverbrauchs mit erneuerbaren Energien zu decken, übermittelte die Bundesregierung im Sommer den Nationalen Aktionsplan an die Brüsseler Kommission.¹ Er zeigt, wie Deutschland dieses Ziel erreichen will. So ist für 2020 im Strombereich bereits ein erneuerbarer Anteil von gut 38 % vorgesehen. Das ist mehr als eine Verdoppelung in nur 10 Jahren.

// 2010: the year of target-setting for renewable energy

2010 was a year with far-reaching objectives for renewable energy sources. As per the EU Directive enacted last year, obliging Germany to cover 18% of its gross final energy consumption with renewable energy by 2020, the Federal Government handed over the National Renewable Energy Action Plan to the Commission in Brussels last summer.¹ It outlines the way Germany wants to achieve this target. A share of 38% renewable electricity is intended for 2020. This is more than a doubling in just 10 years.



Im September 2010 hat die Bundesregierung mit ihrem Energiekonzept eine langfristige Zielsetzung bis zum Jahr 2050 vorgelegt, mit der die Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisjahr 1990 um 80% bis 95% reduziert werden sollen.² Sie bedeutet, dass 2050 mindestens 80% des Strombedarfs und mindestens 60% des Bruttoendenergieverbrauchs, d. h. einschließlich Wärme und Kraftstoffen, aus erneuerbaren Energien gedeckt werden sollen. Dass solche Zielsetzungen heute politisch möglich sind, ergibt sich nicht zuletzt aus der Erfolgsgeschichte der erneuerbaren Energien in Deutschland. Mit hoher Kontinuität über inzwischen 20 Jahre haben Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft eine Entwicklung getragen, die Deutschland international in weiten Bereichen zu einem Vorreiter gemacht hat. Dabei wurden die gesteckten Ziele immer wieder deutlich übertroffen.

// Konzeption einer regenerativen Vollversorgung

Angesichts der bereits erreichten und der absehbaren technischen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit der Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energien sollten wir auch über den Weg zu einer vollständig regenerativen Energieversorgung nachdenken (siehe Abb. 1). Ein solches Konzept wurde im Sommer 2010 von sieben Mitgliedsinstituten des Forschungsverbundes Erneuerbare Energien (FVEE) unter maßgeblicher Beteiligung des ZSW in die gesellschaftliche Diskussion eingebracht (siehe Abb. 2).³

In September 2010, the Federal Government presented their Energy Concept including long-term objectives for the year 2050, according to which greenhouse gas emissions have to be reduced by 80% to 95% compared to 1990.² This means that by 2050, at least 80% of the electricity demand and at least 60% of the gross final energy consumption, including heat and fuels, has to be covered by renewable energy sources. That such goals are politically possible today is mainly a result of the success story of renewable energy in Germany. With a high degree of continuity over the last 20 years, politics, industry, science and society have supported a development allowing Germany to pioneer many areas worldwide. In doing so, objectives were exceeded time and again.

// The conception of an entirely renewable energy supply

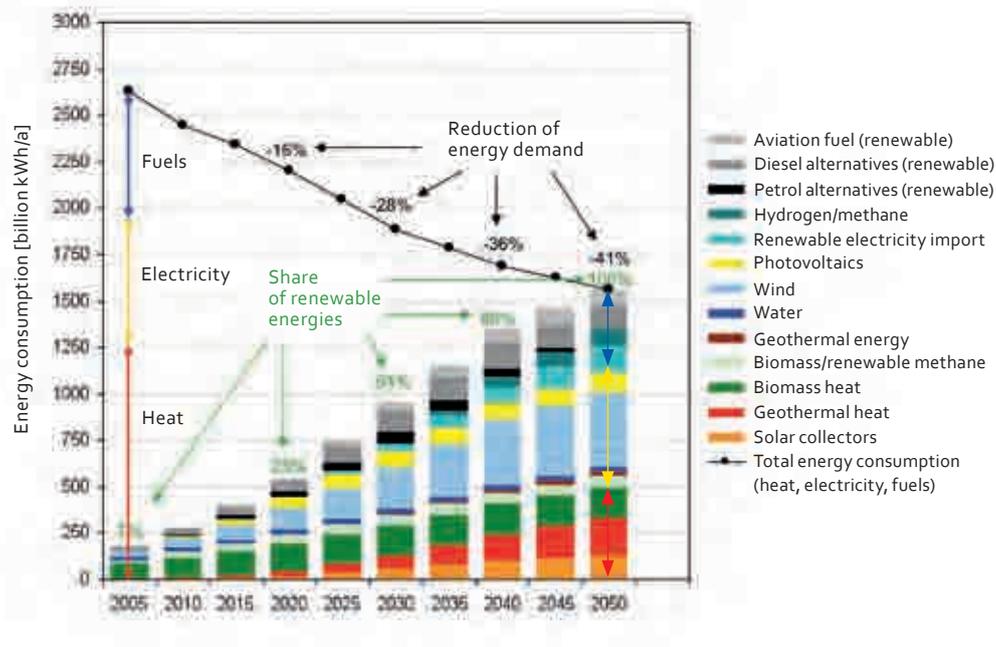
Given the already achieved and the foreseeable technical and economic performance of the systems utilising renewable energy sources, we should also start to think about the path leading to a fully renewable energy supply (see fig. 1). Such a concept was brought to public debate by seven member institutions of the Renewable Energy Research Association (FVEE) with significant participation of the ZSW (see fig. 2) during the summer of 2010.³

// Abb. 1: Vergleich einer 100%-Versorgung mit erneuerbaren Energien bis 2050 gemäß FVEE-Szenario mit dem Energiekonzept der Bundesregierung vom 28.9.2010.
// Fig. 1: Comparison of a 100% energy supply with renewables by 2050 according to the FVEE scenario with the German government's Energy Concept of 29th September 2010.

Targets for the year	2009 value	2020		2030		2040		2050	
		Federal Government	FVEE						
Reduction of greenhouse gas emissions relative to 1990	22%*	-40%	—	-55%	—	-70%	—	-80–95%	-100%
Share of total energy consumption provided by renewable energy sources	10%	18%	25%	30%	51%	45%	80%	60%	100%
Share of electricity generated by renewable energy sources	16%	35%	45%	55%	77%	65%	94%	80%	100%

* Energy-related greenhouse gas emissions in 2008

// Abb. 2: Mengengerüst einer 100%-Versorgung mit erneuerbaren Energien bis 2050 (gemäß Energiekonzept 2050).
 // Fig. 2: Quantity structure of a 100% supply with renewables by 2050 (according to Energy Concept 2050).



Danach sind die zentralen Bausteine der Transformation der Energieversorgung:

- > eine deutliche Senkung des Wärmebedarfs von Gebäuden
- > der Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplung und Wärmenetzen
- > der Einsatz von thermischen Speichern zum Heizen und Kühlen
- > der Ausbau der Stromerzeugung insbesondere aus Wind und Sonne sowie des Imports von regenerativ erzeugtem Strom
- > die Kopplung von Stromerzeugung und Erdgasnetz durch die Erzeugung und Einspeisung von regenerativem Methan/ Wasserstoff
- > der Einstieg in die regenerative Elektromobilität mit Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen
- > der Einsatz von flüssigen Biokraftstoffen vorrangig im Schwerlast- und Luftverkehr

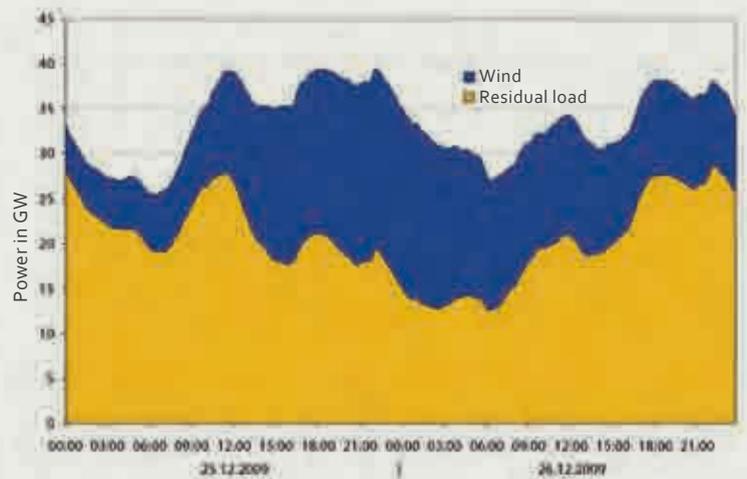
Energieeinsparung und eine höhere Umwandlungseffizienz sowie die Nutzung erneuerbarer Energien sind zwei Seiten einer Medaille. Einsparpotenziale bestehen in erster Linie im Raumwärmemarkt. Deshalb müssen nicht nur der von der Bundesregierung bis 2020 geplante Neubaustandard des „klimaneutralen Gebäudes“, sondern auch die angekündigten Maßnahmen zur deutlichen Erhöhung der Sanierungsrate im Gebäudebestand umgesetzt werden. Den zweiten großen Block für Effizienzmaßnahmen stellt der Verkehr dar. Der Einstieg in die Elektromobilität mit Batteriefahrzeugen für Reichweiten von etwa 200 km und Brennstoffzellenfahrzeugen für größere Reichweiten ist bereits im Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung angelegt, der bis 2020 rund 1 Million und 10 Jahre später mindestens 5 Millionen Elektrofahrzeuge vorsieht.⁴ Langfristig kann der weitaus größte Teil des Verkehrs umgestellt werden. Das ZSW arbeitet intensiv daran,

In this concept, the central components of the transformation of energy supply are:

- > a significant reduction of the heat demand of buildings
- > the expansion of combined heat and power plants and of district heating
- > the application of thermal storage for cooling and heating
- > the further expansion of renewable electricity generation, mainly wind and solar power, and import of renewable electricity
- > linking electricity generation to natural gas grids by producing and feeding regenerative methane/hydrogen into the gas grid
- > venturing into regenerative e-mobility with battery electric and fuel cell vehicles
- > the utilisation of liquid biofuels primarily in heavy goods transport and air traffic

Energy savings and a higher conversion efficiency as well as the utilisation of renewable energy sources are two sides of the same coin. Saving potentials are primarily to be found in the space heating sector. Therefore, not only the announced measures for significantly improving the renovation rate of the building stock have to be implemented but also the planned new building standards of the Federal Government for the “climate-neutral building” in 2020. The second important sector for efficiency measures is transportation. The entry into e-mobility based on battery electric vehicles for distances up to 200 km and fuel cell vehicles for longer distances is already laid out in the National Development Plan for E-Mobility of the Federal Government, which envisions about 1 million electric vehicles by 2020 and at least 5 million

// Focus



// Abb. 3: Integration der Windkraft am Beispiel Weihnachten 2009: 60 % Windkraft im deutschen Stromnetz (Quelle: Fraunhofer IWES).
// Fig. 3: Wind power integration: Status today (Christmas 2009: Up to 60% wind power in German electricity grid; source: Fraunhofer IWES).

© Bundesverband WindEnergie e.V.

den Einstieg in die Elektromobilität technologisch voranzubringen: Unser Tätigkeitsspektrum reicht von der Materialforschung über die Entwicklung von Produktionsverfahren bis hin zu Lebensdauer- und Sicherheitstests für Komponenten und Systeme. Dabei stützen wir uns auf mehr als 20 Jahre Erfahrung im Bereich von Lithium-Ionen-Batterien und Brennstoffzellen für mobile und stationäre Anwendungen.

// Transformation der Stromversorgung

Insgesamt wird die Energieversorgung damit stärker auf Strom basieren als bisher. Und während heute bereits jede sechste Kilowattstunde aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, soll es 2020 bereits mehr als jede dritte sein. Deutlich zunehmen wird insbesondere die Stromerzeugung aus Wind und Sonne. Nach dem Nationalen Aktionsplan der Bundesregierung sollen bis 2020 rund 10.000 MW Offshore-Windleistung, rund 36.000 MW Windleistung an Land und knapp 52.000 MW Photovoltaik-Leistung am Netz sein. Neben der steuerbaren Stromerzeugung aus Wasserkraft, Biomasse und Geothermie werden damit annähernd 100.000 MW fluktuierende Stromerzeugung am Netz sein (siehe Abb. 3), die zeitweise allein in der Lage sind, den Strombedarf vollständig zu decken.

ten years later.⁴ In the long run, the vast majority of traffic can be switched to electric drives. The ZSW is working hard to bring about the technological requirements for an entry into e-mobility: Our activities range from materials research and the development of manufacture methods to life cycle and safety tests for components and systems. We can draw upon over 20 years of experience in lithium-ion batteries and fuel cells for mobile and stationary applications.

// The transformation of power supply

Overall, energy supply will be more heavily based on electricity than ever before. While one in six kilowatt hours is generated from renewable energy sources today, it will be more than one in three by 2020. In particular electricity generation based on wind and the sun will increase significantly. According to the National Renewable Energy Action Plan presented by the Federal Government, around 10,000 MW of offshore wind power capacity, 36,000 MW of land-based wind power capacity and nearly 52,000 MW of photovoltaic power capacity will be connected to the grid by 2020. In addition to the controllable electricity production from hydropower, biomass and geothermal energy, nearly 100,000 MW of fluctuating electricity generation will be connected to the grid (see fig. 3) and be partially able to meet the total electricity demand.

// Abb. 4: Mögliche Realisierung des „Power-to-Gas“-Konzepts in Verbindung mit einer Biogasanlage (als CO₂-Quelle).
 // Fig. 4: Possible realisation of the „Power-to-Gas“ concept in combination with a biogas plant (as a CO₂ source).



Daraus ergeben sich erhebliche Herausforderungen für die Transformation des Stromsektors:

- > Ausbau der Stromnetze
- > gut regelbare Kraftwerke im konventionellen Bereich
- > Management der regenerativen Erzeugung
- > Maßnahmen zur Beeinflussung der Stromnachfrage
- > Speichertechnologien
- > stärkerer europäischer Strommarktverbund

Die verschiedenen Maßnahmenbereiche müssen gut aufeinander abgestimmt sein, um ein optimales Funktionieren zu gewährleisten. Sowohl die kurzzeitigen als auch die saisonalen Schwankungen von Sonne und Wind sind auszugleichen. Für die Pufferung der kurzzeitigen Schwankungen der weit verteilten gebäudemontierten Photovoltaik-Anlagen bieten sich als ein Element dezentrale Batteriespeicher an, die ins Niederspannungsnetz integriert werden können. Das ZSW entwickelt hierfür geeignete Konfigurationen und stationäre Batterietechnologien. Für die längerfristige Speicherung im großen Stil bietet sich die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff und dessen Einsatz im Verkehr oder Beimischung zum Erdgas an. Darüber hinaus wurde vom ZSW mit dem „Power-to-Gas“-Konzept eine Speicheroption entwickelt, die eine Speicherung von Strom in der Megawatt-Klasse erlaubt. Durch die Kopplung von Strom- und Erdgasnetz wird dabei erstens auf vorhandene Infrastrukturen zurückgegriffen, zweitens eine saisonale Speicherung großer Strommengen möglich und drittens die Bereitstellung CO₂-neutraler Kraftstoffe in Form von regenerativ erzeugtem Erdgas möglich.

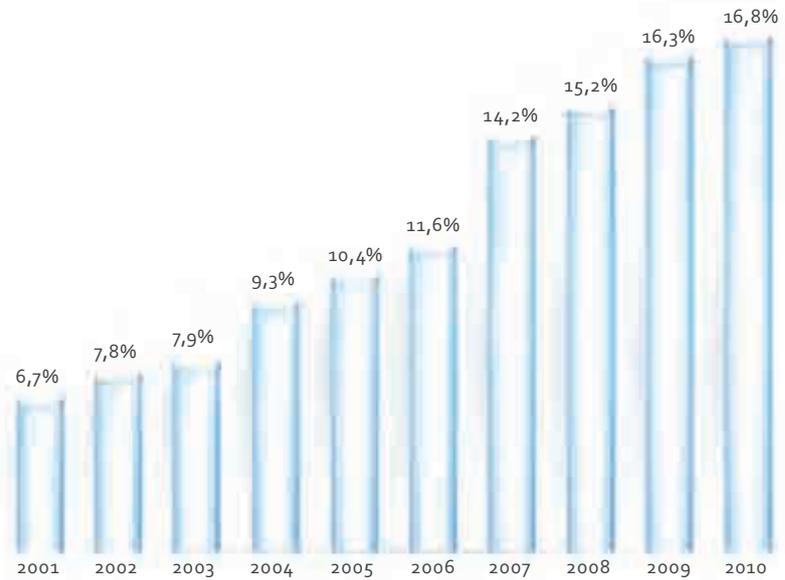
This will result in significant challenges for the transformation of the electricity sector:

- > expansion of power grids
- > easily controllable fossil fuel power plants
- > management of renewable-based electricity generation
- > measures influencing the demand for electricity
- > storage technologies
- > stronger interconnection of the European electricity market

The various areas need to be inter-coordinated in order to ensure optimal functioning. Both the short-term and the seasonal fluctuations of the sun and wind have to be balanced. To buffer the short-term fluctuations of the widely distributed building-mounted photovoltaic systems, decentralised battery storages which can be integrated into the low voltage grid are a viable option. For this purpose, ZSW developed suitable configurations and stationary battery technologies. In addition, ZSW also developed the “Power-to-Gas” concept, a storage option that allows for storage of electricity in the megawatt range. By linking power grids and natural gas grids, existing infrastructures can be utilised and the seasonal storage of large amounts of electricity becomes possible along with the provision of CO₂-neutral fuels in the form of the renewable energy source natural gas.

// Focus

// Der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch in Deutschland ist seit 2001 von 6,7 % auf 16,8 % 2010 gestiegen.
 // The share of renewable energy sources in the gross electricity consumption in Germany has increased from 6.7% in 2001 to 16.8% in 2010.



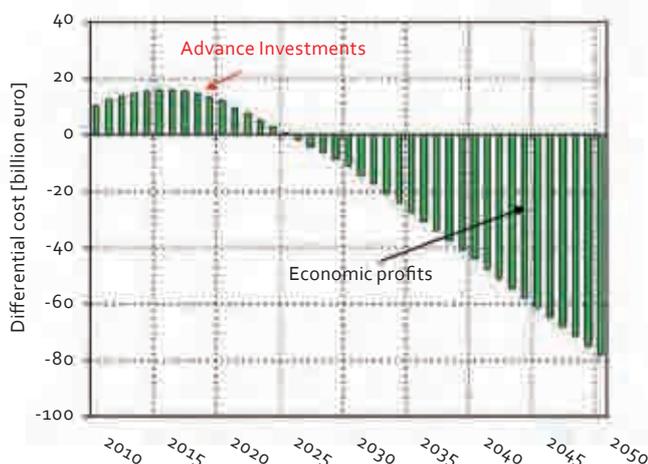
// Kosten und Nutzen der Systemtransformation

Die Transformation des Energiesystems dient dem Klimaschutz, der Reduktion von Energieimporten mit ihren ökonomischen und politischen Risiken sowie der Erschließung von Innovationspotenzialen. Andererseits sind damit jährliche Investitionen im zweistelligen Milliarden-Euro-Bereich verbunden, so dass das Verhältnis von Kosten und Nutzen einer sorgfältigen Abwägung unterzogen werden muss. Neben dem Aufbau der notwendigen Systeminfrastruktur spielen dabei die Kostenentwicklung konventioneller Energieträger einerseits und der erneuerbaren Energien andererseits eine große Rolle. Es kann gezeigt werden, dass bei einem moderaten Anstieg der Preise für fossile Energieträger von etwa 2 % pro Jahr die Wettbewerbsfähigkeit des Mixes erneuerbarer Energien um das Jahr 2025 erreicht werden kann. Die volkswirtschaftlichen Gewinne würden dann bis 2050 die erbrachten Vorleistungen mehrfach übersteigen (siehe Abb. 5).

// Costs and benefits of the system transformation

The transformation of the energy system serves to protect the climate, to cut down on energy imports along with incurred economic and political risks and to unlock innovation potential. On the other hand, annual investments in the tens of billions of euro are required, so cost-benefit ratio has to be considered carefully. In addition to building the required system infrastructure, the cost development of fossil and renewable energy sources plays a major role. It can be shown that with a moderate rise in fossil fuels prices of about 2% per year, the mix of renewable energy sources could be competitive by the year 2025. The economic benefits would amount to several times the provided inputs (see fig. 5) by 2050.

// Abb. 5: Differenzkostenentwicklung des 100%-Szenarios des FVEE – Beispiel Strom- und Wärmeerzeugung.
 // Fig. 5: Differential cost development of the 100% scenario – example for electricity and heat generation.



Basisannahmen für fossile Energien:

- > Der Ölpreis steigt bis 2050 auf 210 US\$ je Barrel.
- > Die Kosten für CO₂-Emissionen steigen auf 70 € je Tonne.
- > Der anlegbare Strompreis für erneuerbare Energien steigt von etwa 6 ct/kWh auf 15 ct/kWh (entsprechend 2,3%/a).
- > Der anlegbare Wärmepreis steigt von etwa 10 ct/kWh auf 22 ct/kWh (entsprechend 2,0%/a).

Der Kostenschnittpunkt des Mixes erneuerbarer Energien wird um das Jahr 2025 erreicht. Den Vorleistungen stehen langfristig erheblich höhere volkswirtschaftliche Gewinne gegenüber.

Basic assumptions for fossil fuels:

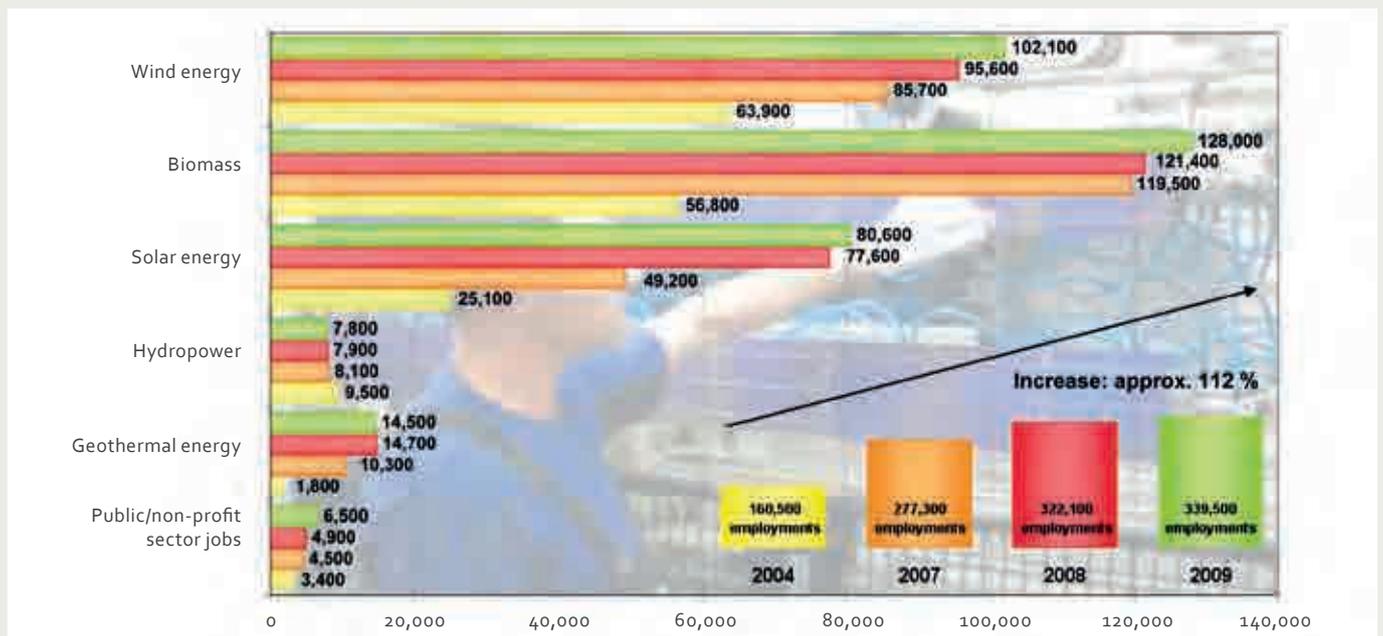
- > The cost of oil increases to US\$210 per barrel by 2050.
- > The costs for CO₂ emissions increase to €70 per tonne.
- > The applicable price for renewable electricity increases from approx. 6 c/kWh to 15 c/kWh (corresponds to 2.3%/a).
- > The applicable price for heating increases from approx. 10 c/kWh to 22 c/kWh (corresponds to 2.0%/a).

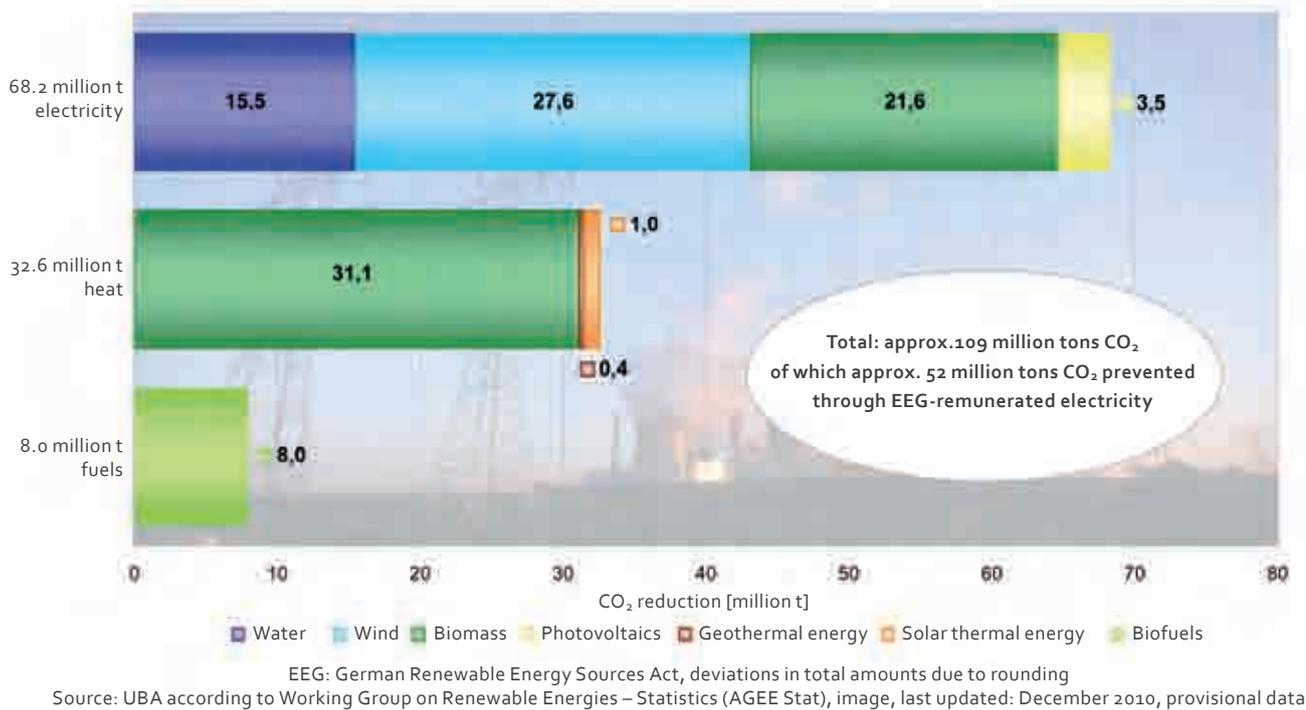
The renewable energy mix achieves cost parity around 2025. From then on, the prior investments will reap considerably higher, long-term economic profits.

Im Zentrum der Debatte, ob die Höhe der Förderung erneuerbarer Energien angemessen ist, steht das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).⁵ Es regelt die Zahlung von Einspeisevergütungen, die einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlagen ermöglichen sollen und dementsprechend nach Technologien, Anlagengrößen usw. differenziert sind. Mit dem sprunghaften Anstieg der Installation von Photovoltaikanlagen nahmen die EEG-Vergütungszahlungen insgesamt deutlich zu. Auf der Grundlage der daraus berechneten Differenzkosten legt die Bundesnetzagentur jährlich die sogenannte EEG-Umlage fest, mit der die Differenzkosten auf die Stromverbraucher verteilt werden. Als die Behörde im Oktober 2010 bekannt gab, dass die Umlage 2011 von 2,05 Cent auf gut 3,5 Cent pro Kilowattstunde steigen wird, gerieten die Erneuerbaren, allen voran die Photovoltaik, erneut ins Kreuzfeuer der Kritik. Denn 5,3 Mrd. € Differenzkosten durch das EEG im Jahr 2009 sind in der Tat auf den ersten Blick eine stattliche Summe, die absehbar noch etwas ansteigen wird, bevor sie in einigen Jahren ihr Maximum durchläuft. Übersehen wird bei der Diskussion über die Kosten jedoch allzu oft der volkswirtschaftliche Nutzen, den der Ausbau der erneuerbaren Energien mit sich bringt. So wurden im Jahr 2009 rund 20 Mrd. € in Erneuerbare-Energien-Anlagen investiert, wovon knapp 17 Mrd. € auf das EEG zurückzuführen sind. Angesichts dieser Zahlen verwundert auch nicht, dass sich die erneuerbaren Energien in den vergangenen Jahren zum Jobmotor entwickeln konnten: 2009 zählte die Branche bereits insgesamt fast 340.000 Beschäftigte, wobei der größte Teil im Bereich der stromerzeugenden Systeme entstanden ist (siehe Abb. 6).

The German Renewable Energy Sources Act (EEG) is at the centre of the debate on whether the amount of subsidies for renewable energy is appropriate.⁵ It regulates remuneration, which is supposed to allow for a profitable operation of the systems, and it distinguishes between the employed type of technology, plant size, etc. With the surge in installations of photovoltaic systems, the total amount of EEG remuneration payments increased considerably. On the basis of the calculated differential costs, the Federal Network Agency annually determines the EEG reallocation charge with which the differential costs are allocated to the electricity consumers. In October 2010, when the Agency announced that the reallocation charge of 2.05 cent was to increase to 3.5 cent per kilowatt hour, renewable energy, and especially photovoltaics, found themselves caught in a crossfire of criticism. Indeed, € 5.3 billion in differential costs due to the EEG from 2009 is a considerable amount and it is predicted to increase somewhat before reaching its maximum in a few years. What, however, is often overlooked in the discussion about costs are the economic benefits brought about by the expansion of renewable energy. In 2009, some € 20 billion were invested into renewable energy plants, of which about € 17 billion were due to the EEG. In view of these figures, it is not surprising that renewable energy has become a job engine over the past few years: In 2009, the industry already had a total of nearly 340,000 employees, with the majority in the area of systems generating electricity (see fig. 6).

// Abb. 6: Entwicklung der Bruttobeschäftigung durch erneuerbare Energien zwischen 2004 und 2009 in Deutschland.
 // Fig. 6: Development of gross employment between 2004 and 2009 in Germany as a result of using renewable energy.





// Abb. 7: Vermiedene CO₂-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland 2009.
 // Fig. 7: CO₂ emissions prevented in Germany in 2009 by using renewable energy.

Ebenfalls nicht zu vergessen ist der ökologische Nutzen: Rund 109 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen hat die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2009 vermieden. Ohne die erneuerbaren Energien wären unsere CO₂-Emissionen somit 14 % höher als tatsächlich gewesen. Von den Einsparungen sind allein 52 Mio. Tonnen auf das EEG zurückzuführen, das damit auch das derzeit erfolgreichste Klimaschutzinstrument in Deutschland ist. Zusätzlich konnten 2009 Energieimporte im Wert von rund 5,7 Mrd. € vermieden werden (siehe Abb. 7).

Wichtig ist weiterhin, darauf hinzuweisen, dass die nach der im EEG festgelegten Methodik ausgewiesenen Differenzkosten nur die halbe Wahrheit sagen. Denn das Angebot an Regenerativstrom führt dazu, dass fossile Kraftwerke mit relativ hohen Grenzkosten nicht zur Deckung der Stromnachfrage eingesetzt werden müssen (sog. Merit-Order-Effekt). Dadurch üben die erneuerbaren Energien einen dämpfenden Einfluss auf den Preis an der Strombörse aus. Dies trifft in besonderem Maße auf die Photovoltaik zu, die schwerpunktmäßig zur mittäglichen Spitzenlastzeit einspeist. Der Belastung durch das EEG auf der einen Seite steht somit auf der anderen Seite eine Entlastung gegenüber. Studien zeigen, dass die Höhe des Merit-Order-Effekts zumindest in den vergangenen Jahren etwa in der gleichen Größenordnung wie die Differenzkosten lag.

The environmental benefit should not be forgotten either: Thanks to renewable energy, around 109 million tonnes in CO₂ emissions were saved in Germany in 2009. Of this amount, 52 million tonnes are due to the EEG, which is therefore the most successful climate protection instrument available in Germany today. In addition, the necessity of energy imports valued at around € 5.7 billion was sidestepped in 2009 (see fig. 7).

It is also important to point out that the methodology defined in the EEG for determining the differential costs is only half the story. As a consequence of the supply with regenerative power, it is not necessary to use fossil power plants with relatively high marginal costs to cover the electricity demand (so-called merit-order effect). Renewable energy has a dampening effect on the energy exchange price. This is particularly true for photovoltaics, feeding primarily during the mid-day peak hours. The burden caused by the EEG is counterbalanced by this fact. Studies show that in recent years, the merit-order effect was at least of the same order of magnitude as the differential costs.



© Deutscher Bundestag/Katrin Neuhauser

// Politik und Politikberatung als Erfolgsfaktoren

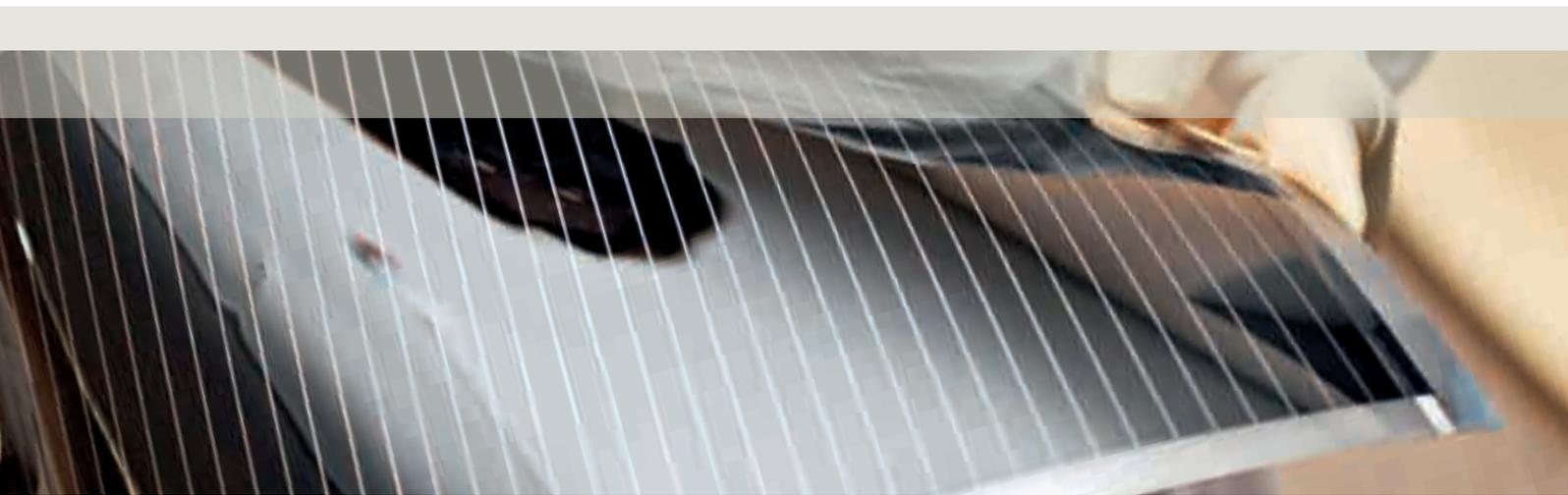
An der Entwicklung der erneuerbaren Energien wird deutlich, dass oftmals die richtigen politischen Weichenstellungen zur rechten Zeit entscheidend sind, um Technologien voranzubringen. Ohne weitsichtige Politik hätten die erneuerbaren Energien ihre Erfolgsgeschichte nicht schreiben können. Anreizinstrumente wie das EEG können aber nur dann dauerhaft erfolgreich sein, wenn sie einer regelmäßigen Evaluierung unterzogen und angepasst werden. An diesen Stellen setzt die wissenschaftliche Beratung des ZSW-Fachgebietes Systemanalyse an. Es unterstützt die Bundesregierung und politische Akteure seit der Einführung des EEG im Jahr 2000 und erarbeitete die Grundlagen für die Novellierungen des EEG 2004 und 2009. Und auch aktuell koordiniert das Fachgebiet Systemanalyse mehrere Forschungsvorhaben zur Vorbereitung des nächsten EEG-Erfahrungsberichts, der 2011 vorgelegt werden soll. Ebenso wie die Bundesregierung unterstützt das ZSW die Landesregierung Baden-Württemberg. Im Rahmen des Energiekonzepts 2020 wurde ein Pfad für den mittelfristigen Ausbau von erneuerbaren Energien und Kraft-Wärme-Kopplung vorgezeichnet, dessen Verfolgung durch die Unterstützung des Monitorings überwacht wird.⁶ Im Rahmen des „Klimaschutzkonzepts 2020 plus“⁷ entwickelten wir zudem eine Vision, wie die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien auch in Baden-Württemberg langfristig aussehen kann.

Im Rahmen von Evaluierungen, wie wir sie nicht nur für das EEG, sondern auch für das Marktanzreizprogramm des Bundes für erneuerbare Wärme⁸ oder das Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Wärme in Baden-Württemberg durchführten, werden Förderinstrumente auf ihre Effizienz und Zielgenauigkeit hin überprüft. Zum einen kann auf diese Weise das Erreichen von Ausbauzielen sichergestellt werden, zum anderen können nur so Mitnahmeeffekte vermieden und damit die Akzeptanz für die Förderung erhalten werden. Bei Evaluierungen des EEG steht stets im Vordergrund, die Vergütungssätze regelmäßig der Kostenentwicklung anzupassen. Manchmal sind technologischer Fortschritt und Marktentwicklung dabei deutlich schneller als erwartet. So hat die weltweit rasante Entwicklung der Photovoltaik dazu geführt, dass die Anlagenpreise innerhalb kurzer Zeit drastisch gesunken

// Politics and political consulting as success factors

When looking at the overall development of renewable energy, it becomes apparent that the right political choices made at the right time are key in advancing technologies. Without such a far-sighted policy, renewable energy sources would not have been able to write their own success story. Incentives such as the EEG can only be permanently successful if they are continuously evaluated and adjusted. This is where the scientific consultation provided by the ZSW Systems Analysis department comes into play. It has been supporting the Federal Government and their political actors since the introduction of the EEG in 2000 and laid the groundwork for the amendments to the EEG in 2004 and 2009. Currently, the Systems Analysis department is coordinating several research projects in preparation for the next EEG report, which is to be presented in 2011. Along with the Federal Government, the ZSW supports the State Government of Baden-Württemberg. As part of the Energy Concept 2020, a path for the medium-term expansion of renewable energy and combined heat and power was mapped out, whose implementation is overseen with the aid of monitoring.⁶ As part of the “Climate Protection Concept 2020 plus”⁷, we also developed a vision as to how the full transition towards renewable energy in Baden-Württemberg could be achieved.

In the context of evaluations we performed not only for the EEG but also for the federal market incentive programme for renewable heat or the law on utilising renewable heat⁸ in Baden-Württemberg, funding instruments were examined as to their efficiency and accuracy. On the one hand, reaching extension objectives is ensured and on the other hand, free-rider effects are avoided and acceptance of funding is maintained. When evaluating the EEG, adapting the remuneration rates to the price development is in the foreground. Sometimes, technological progress and market development are significantly faster than expected. The rapid global development of photovoltaics resulted in system prices dropping

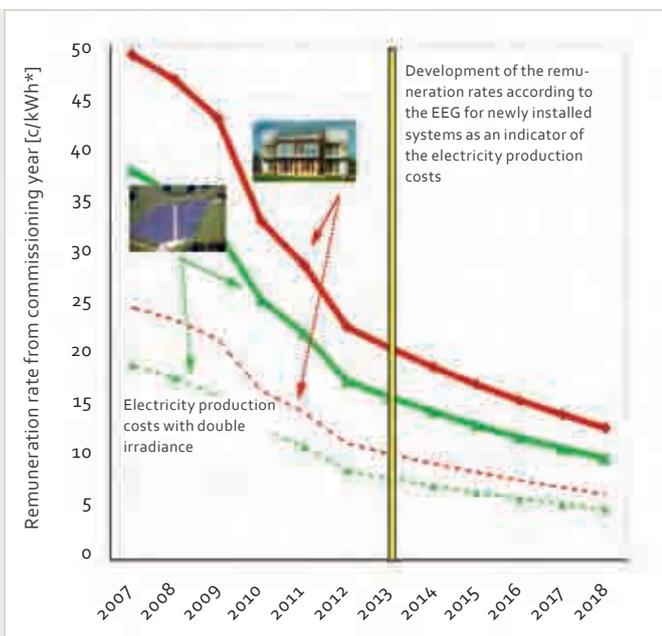


sind und eine Überförderung durch das EEG drohte. Daher wurden die Vergütungssätze im Jahr 2010 vom Gesetzgeber außerplanmäßig reduziert – ebenfalls auf der Grundlage von Analysen der ZSW-Systemanalytiker.

Das EEG ist auch vor dem Hintergrund notwendiger Kostensenkungen bei Technologien ein sehr erfolgreiches Instrument. Denn durch die jährliche Absenkung der Vergütungssätze für Neuanlagen („Degression“) besteht ein erheblicher Kostendruck. Wie Abbildung 8 am Beispiel der Photovoltaik zeigt, ist es gelungen, die Solarstromkosten innerhalb weniger Jahre annähernd zu halbieren. Das EEG wirkt darüber hinaus als Innovationsbeschleuniger, denn ohne technologische Fortschritte wäre diese Entwicklung nicht möglich gewesen. Das ZSW leistet mit seiner Forschung und Entwicklung zu CIGS-Dünnschicht-Solarzellen dafür einen wichtigen Beitrag. Nachdem es im vergangenen Jahr gelungen ist, mit 20,3% Wirkungsgrad den Weltrekord für Dünnschicht-Solarzellen aus den USA nach Deutschland zurückzuholen,⁹ wird sich die kostendämpfende Wirkung höherer Wirkungsgrade zeitnah auch in kommerziellen Produkten niederschlagen.

within short periods of time along with risks of possible over-funding by the EEG. Therefore, in a non-scheduled move, the remuneration rates were lowered by the legislature in 2010 – again on the basis of analyses provided by ZSW systems analysts.

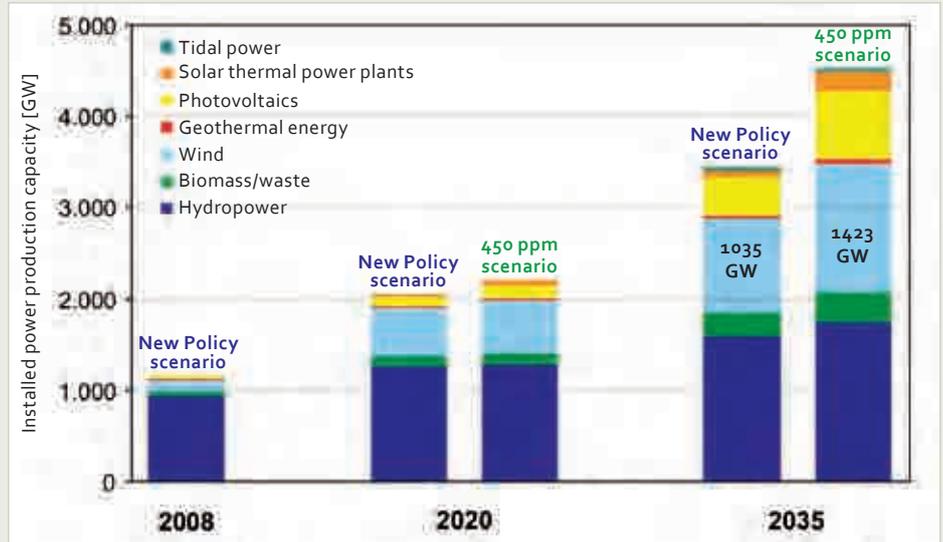
The EEG is also a very successful tool against the background of necessary cost reductions related to technologies. Due to the annual reduction in remuneration rates for new systems (“degression“), there is a significant cost pressure. As figure 8 shows using the example of photovoltaics, solar power costs were nearly halved within a few years. The EEG also serves as an innovation accelerator, as this development would not have been possible without technological progress. The ZSW makes an important contribution in the form of research and development of CIGS thin-film solar cells. After succeeding in winning back the world record for efficiency rates of thin-film solar cells from the USA⁹ with a value of 20.3%, the cost-reducing effect of higher efficiency rates is set to soon be reflected in commercial products.



// Abb. 8: Beispiel Photovoltaik: Wie die degressiven Vergütungssätze des EEG für Neuanlagen erneuerbare Energien in die Wirtschaftlichkeit führen.
 // Fig. 8: As the example of photovoltaics shows: Degressive remuneration rates lead renewable energy systems to feasibility.

*Nominal values, expected degression 2012: 13%, 2013: 21%, from 2014: at least 9%

// Abb. 9: Entwicklung der Stromerzeugungskapazität in verschiedenen IEA-Szenarien.
 // Fig. 9: Development of installed power production capacity in different IEA scenarios.



// Entwicklung der weltweiten Märkte für erneuerbare Energien

Entscheidend ist, dass langfristig in einstrahlungsreicheren Ländern Stromgestehungskosten der Photovoltaik von deutlich unter 10 ct/kWh erreicht werden, sodass weltweit ein sich selbst tragender Photovoltaikmarkt entstehen kann. Eine ähnliche Entwicklung vollzieht sich bereits seit einigen Jahren im Bereich der Windenergie. Inzwischen sind weltweit rund 200.000 MW Windleistung installiert, die etwa 2 % der globalen Stromerzeugung decken. Voraussichtlich werden in zehn Jahren bereits etwa 10 % des Weltstrombedarfs aus Wind gedeckt werden können. Die solaren Technologien bewegen sich heute im Bereich von 35.000 MW installierter Leistung, gelten aber als Schlüssel der weiteren globalen Entwicklung. Interessant ist hierbei, dass diese Einschätzung neben vielen Studien auch von der Internationalen Energie-Agentur (IEA) in ihrem aktuellen World Energy Outlook¹⁰ geteilt wird (siehe Abb. 9). Je nach Szenario steigt die weltweit installierte Leistung bei Wind auf bis zu 1,3 Mio. MW und bei der Photovoltaik auf 700.000 MW an, also das 20-fache der heutigen Leistung.

// Chancen für die deutsche Wirtschaft

Die Internationale Energie-Agentur geht davon aus, dass mit dem Ausbau erneuerbarer Energien im Strommarkt in den nächsten 25 Jahren ein Investitionsvolumen von insgesamt 5.700–6.900 Mrd. US\$ verbunden ist. Davon können deutsche Unternehmen erheblich profitieren, denn sie sind in vielen Bereichen führend.

// Global market development for renewable energy sources

It is essential that, in the long term, photovoltaic electricity generation costs of well below 10 c/kWh are reached for countries with an abundance of solar irradiation, so that a self-sustaining photovoltaic market can be established. A similar development has already been taking place in the field of wind energy for several years now. In the meantime, over 200,000 MW of wind capacity have been installed worldwide, covering about 2 % of the global demand for electricity. It is expected that in ten years' time, wind energy could cover about 10 % of the global demand. Solar technologies are now within the range of 35,000 MW of installed capacity but are considered key to the further global development. It is interesting to note that this assessment, in addition to many other studies, is shared by the International Energy Agency (IEA) in their latest World Energy Outlook¹⁰ (see fig. 9). Depending on the scenario, the world's installed wind energy capacity will increase to up to 1.3 million MW and the photovoltaic capacity to 700,000 MW – 20 times the capacity today.

// Opportunities for the German economy

The International Energy Agency estimates that the expansion of renewable energy during the next 25 years will bring about a total investment of 5,700–6,900 billion US\$ into the electricity market. German companies could profit from this as they are leading in several areas. The wind energy industry generated a



So erwirtschaftete die Windbranche im Jahr 2009 mit etwa 100.000 Arbeitsplätzen bei einer Exportquote von 75 % einen Umsatz von 6,4 Mrd. €. Daneben dürfte Deutschland beim Photovoltaik-Produktionsanlagenbau oder bei Wechselrichtern nach wie vor einen Weltmarktanteil von rund 50 % haben.

Beide Bereiche zeigen, dass die Chance für die deutsche Wirtschaft besonders im Bereich der technologisch anspruchsvollen Komponenten, Anlagen und Systeme liegt. Nach einer Untersuchung zu den Beschäftigungswirkungen der Erneuerbare-Energien-Branche, an der auch das ZSW beteiligt war, kann sich unter günstigen Rahmenbedingungen die Zahl der Arbeitsplätze bis 2030 auf bis zu 600.000 in etwa verdoppeln.¹¹ Dies setzt aber voraus, dass die guten Rahmenbedingungen für die Unternehmen in Deutschland erhalten bleiben und der Umbau der Energieversorgung fortgesetzt wird. Als Impulsgeber kommt der Wissenschaft dabei eine wichtige Funktion zu. Mit welchem Engagement und welchen Erfolgen die Wissenschaftler und Ingenieure des ZSW diese Aufgabe erfüllen, zeigen die Berichte aus unseren Fachgebieten im vorliegenden Jahresbericht.

total revenue of about € 6.4 billion in 2009 – with about 100,000 jobs and an export quota of 75%. In addition, Germany is likely to retain a global market share of about 50% in photovoltaic systems manufacture and inverters.

Both areas show that there is a chance for the German economy especially in the areas of technologically sophisticated components, plants and systems. According to a study on the employment effects of the renewable energy industry, in which the ZSW was involved, the number of jobs could double to approximately 600,000 by 2030 under favourable conditions.¹¹ This presupposes, however, that the appropriate framework conditions for companies in Germany remain intact and that the transformation of the energy supply system is continued. Science plays an important role here, as it is a driving force. The reports on the various fields of activity in this annual report bear witness to the commitment and the successes with which the scientists and engineers at the ZSW perform this task.

¹ www.erneuerbare-energien.de/inhalt/46202

² www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energiekonzept_bundesregierung.pdf

³ www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06_FVEE-Eckpunktepapier.pdf

⁴ www.bmwi.de/Dateien/BMWi/PDF/nationaler-entwicklungsplan-elektromobilitaet-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf

⁵ www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/40508.php

⁶ www.energiekonzept-bw.de/

⁷ www.uvm.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/76162/

⁸ www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/46978.php

⁹ www.zsw-bw.de/fileadmin/ZSW_files/Infoportal/Presseinformationen/docs/pi11-2010-ZSW-Weltrekord2-DS-CIGS.pdf

¹⁰ www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=2311

¹¹ www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/46538.php

// Authors

Dr. Frank Musiol

Prof. Dr. Frithjof Staif





// Fachgebiete und Projekte
Departments and Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Von Beschlüssen auf der Ebene von Kommunen, Regionen und Bundesländern über das neue Energiekonzept der Bundesregierung bis hin zur EU-Richtlinie – ambitionierte Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien haben Hochkonjunktur. Doch was ist notwendig, um diese Ziele zu erreichen? Wie wirken Förderinstrumente und wie müssen sie weiterentwickelt werden? Wie weit sind wir mit der Nutzung erneuerbarer Energien schon fortgeschritten? Was kostet uns der Weg in eine nachhaltige Energieversorgung und welchen ökonomischen Nutzen bringt er? Mit diesen Fragen beschäftigt sich das interdisziplinäre Team aus Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaftlern des Fachgebiets Systemanalyse.

Mit Machbarkeitsstudien, der Entwicklung und Evaluierung von Förderinstrumenten sowie ökonomischen Analysen zeigt das Fachgebiet im Rahmen der Politikberatung Wege auf, wie erneuerbaren Energien, Speicher- und Effizienztechnologien der Markt bereitet und unser Energieversorgungssystem nachhaltig umgestaltet werden kann. Hinzu kommen langjährige Erfahrungen im Monitoring des Ausbaus erneuerbarer Energien einschließlich der Entwicklung fundierter Statistiken auf Bundes- und Landesebene. Eine Forschergruppe, die sich auf nichtlineare Modellierungen und deren Anwendung unter anderem bei der Integration erneuerbarer Energien ins Stromnetz spezialisiert hat, rundet die Kompetenzen des Fachgebiets ab.

// Our Main Focus

From the resolutions passed at the local authority, regional and federal state levels to the new energy concept of the German Federal Government and the EU Directive – ambitious goals for expanding renewable energy are experiencing a boom. But what needs to be done to attain these goals? What impact do subsidy instruments have and how must they be further developed? How much progress has already been made in utilising renewable energies? How much will the route to sustainable energy supplies cost us and what will be the economic benefits? These are the issues dealt with by the interdisciplinary team of scientists, engineers and economists in the Systems Analysis research department.

By means of feasibility studies, developing and evaluating promoting instruments and economic analyses, the research department shows, as part of its policy consultation, ways in which renewable energies and storage as well as efficiency technologies can break into the market and how our energy supply systems can be reshaped to achieve sustainability. It can also call on many years of experience in monitoring the expansion of renewables including the development of well-founded statistics at the national and regional levels. The research department's expertise is rounded off with a research group specialising in non-linear modelling and its application, including for integrating renewable energies into the power grid.



// Contact

Dr. Frank Musiol

E-Mail: frank.musiol@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-217

// Monitoring des Ausbaus erneuerbarer Energien

Monitoring the Development of Renewable Energies

// Leitung der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat)

Der Ausbau erneuerbarer Energien rückt immer stärker in den Fokus politischer Entscheidungen. Gemäß der EU-Richtlinie 2009/28/EG ist Deutschland verpflichtet, bis zum Jahr 2020 mindestens 18% seines gesamten Bruttoendenergieverbrauchs mit erneuerbaren Energien zu decken. Das im September 2010 durch die Bundesregierung verabschiedete Energiekonzept wird sogar noch konkreter, indem für den Strombereich ein Ziel von 35% für 2020 formuliert wird. Ambitionierte Zielsetzungen erfordern ein belastbares Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien. Hierfür trägt die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) Verantwortung. Das unabhängige, mit Vertreter/innen aus Ministerien, Bundesämtern und Fachinstitutionen besetzte Fachgremium arbeitet seit 2004 im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Bis zum Jahr 2015 sind die Koordination und Leitung der AGEE-Stat dem Fachgebiet Systemanalyse des ZSW übertragen worden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland nicht nur jährlich, sondern auch unterjährig bilanziert und fortlaufend im Rahmen umfassender Statistiken dokumentiert. Diese bilden die Grundlage für die Unterstützung der Bundesregierung bei der Erfüllung zahlreicher nationaler und internationaler Berichtspflichten – so auch gegenüber der Europäischen Kommission bezüglich der Erfüllung des 18-Prozent-Ziels. Das Monitoring bestätigt die bislang außerordentlich erfolgreiche Förderung der erneuerbaren Energien in Deutschland und stellt unter anderem umfangreiche Informationen für die Öffentlichkeitsarbeit des Bundesumweltministeriums zur Verfügung.

2009 konnte festgestellt werden, dass sich die erneuerbaren Energien auch im Jahr der Wirtschaftskrise behaupten und ihre Position im Energiemix wieder festigen konnten. So kletterte ihr Anteil am Stromverbrauch auf 16,4% und am gesamten Endenergieverbrauch (Strom, Wärme, Kraftstoffe) auf 10,3%. Die Photovoltaik konnte erstmals mehr als 1% des Strombedarfs decken.

// Management of the Working Group on Renewable Energies – Statistics (AGEE-Stat)

Political decisions are increasingly focussing on the development of renewable energies. In accordance with EU Directive 2009/28/EC, by 2010 Germany is legally obliged to meet at least 18% of its total gross energy consumption with renewable energies. The energy concept adopted by the German government in September 2010 is even more specific, whereby it intends to achieve a target of 35% by 2020 in the electricity sector. These ambitious goals require resilient monitoring of the development of renewable energies. This is the responsibility of the Working Group on Renewable Energies – Statistics (AGEE-Stat). The independent body, which includes representatives from ministries, government agencies and specialist institutions, has been working since 2004 on behalf of the German Federal Ministry of the Environment. Until 2015, ZSW's Systems Analysis department has been given responsibility for coordinating and managing the AGEE-Stat.

As part of this work, the development of renewable energies in Germany will be audited not just annually but also during the year and continually documented with comprehensive statistics. This will form the basis for supporting the German Federal Government in fulfilling its diverse national and international reporting obligations – for example to the European Commission in regards to meeting the 18 per cent target. The monitoring confirms the extraordinarily successful promotion of renewable energies in Germany and, amongst others, provides extensive information for the public relations work of the German Ministry of the Environment.

In 2009, it was determined that renewable energies were able to establish themselves even during the year of the economic crisis and once again consolidate their position in the energy mix. For example, their proportion of the electricity consumption increased to 16.4% and their share of the total energy consumption (electricity, heat, fuels) to 10.3%. Photovoltaics was for the first time able to cover more than 1% of the electricity consumption.

// Contact

Dr. Frank Musiol

E-Mail: frank.musiol@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-217



// Energiekonzept 2050

Energy Concept 2050

// Eine Vision für eine nachhaltige Energieversorgung mit 100% erneuerbaren Energien

Mit dem Ziel, einen substanziellen Diskussionsbeitrag im Hinblick auf das Energiekonzept der Bundesregierung zu leisten, erarbeitete das ZSW-Fachgebiet Systemanalyse gemeinsam mit sechs weiteren Mitgliedsinstituten des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien (FVEE) das „Energiekonzept 2050“. Es skizziert im Kern ein Energieversorgungssystem für Deutschland, das zum einen ausschließlich auf erneuerbaren Energien beruht, zum anderen durch eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz einen deutlich niedrigeren Primärenergiebedarf als heute aufweist. Durch die Einbeziehung aller drei für die Energieversorgung relevanten Sektoren – Strom, Wärme und Verkehr – geht die Betrachtung weiter als viele andere aktuelle „100%-Szenarien“, die sich meist auf den Stromsektor fokussieren. Um zu zeigen, dass eine vollständige Versorgung Deutschlands mit erneuerbaren Energien nicht nur potenziell möglich, sondern auch zu ökonomisch vertretbaren Kosten erreichbar ist, entwickelte das ZSW ein Mengengerüst, das den notwendigen Zubau und die Struktur der zunehmend regenerativen Energieversorgung abbildet. Anschließend wurden die damit verbundenen Kosten berechnet, einer fossil basierten Energieversorgung gegenübergestellt und so die Differenzkosten ermittelt.

Durch den zunehmenden Einsatz von Strom im Wärme- und Verkehrsbereich steigt der Strombedarf im Szenario bis 2050 trotz erheblicher Effizienzfortschritte auf rund 760 TWh deutlich an. Den größten Anteil hieran trägt die Windenergie (an Land und offshore), gefolgt von der Photovoltaik. Hierdurch bedarf es eines deutlichen Ausbaus von Speichertechnologien, wobei im Bereich der Langzeitspeicherung die Option der Wasserstoff- bzw. Methan-erzeugung favorisiert wird. Das erzeugte Gas kann wiederum in allen drei Energiesektoren eingesetzt werden. Im Wärmesektor findet bei deutlich sinkendem Energiebedarf ein verstärkter Aus-

bau der Solarthermie und elektrisch betriebener Wärmepumpen statt. Im Verkehrssektor schließlich bewirkt die Umstellung von Verbrennungsmotoren auf batterieelektrische Antriebe und Brennstoffzellenfahrzeuge erhebliche Effizienzgewinne.

Die Differenzkosten weisen ein Maximum von rund 17 Mrd. € im Jahr 2015 aus. Diese Summe entspricht etwa 8% der Gesamtausgaben für Energie in Deutschland. Der Kostenschnittpunkt mit dem fossilen Energiesystem wird zwischen 2020 und 2030 erreicht. Danach werden die Differenzkosten negativ, d. h. die Umstellung wird volkswirtschaftlich positiv. Die Differenzkostenentwicklung zeigt, dass die derzeitigen Kostenmehrbelastungen durch die Nutzung erneuerbarer Energien langfristig deutlich überkompensiert werden.

// A vision for sustainable energy supplies with 100% renewable energy

Together with six other institutes of the Renewable Energy Research Association (FVEE) the Department of Systems Analysis developed the “Energy Concept 2050” – a scenario for a completely renewable-based energy supply system in Germany in 2050. All three energy-related sectors – electricity, heat and transportation – are included, as well as an accelerated progress concerning energy efficiency. The “Energy Concept 2050” shows that it is not only possible to supply Germany on a 100% renewable basis, but that it is also feasible, as the system transformation can be achieved on an economically justifiable level of costs. These findings are backed by a robust structure of renewable production capacity in 2050. This already implicates a shift to e-mobility and a strong demand for heat-pumps and the resulting increase in electricity consumption. The Concept was drawn to provide a sound counterpart to the energy concept of the German Government.

// Contact

Dipl.-Wirt.-Ing. Maïke Schmidt

E-Mail: maïke.schmidt@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-232

// Ressourcenbasis der Elektromobilität

Resources for Electromobility

// Analyse der Verfügbarkeit des Rohstoffs Lithium

Im Zuge der weltweiten Entwicklungen zur Elektromobilität und des damit verbundenen wachsenden Marktes für Lithium-Ionen-Batterien wird zunehmend die Verfügbarkeit des Rohstoffs Lithium diskutiert und in Frage gestellt. Das Fachgebiet Systemanalyse des ZSW hat daher die Verfügbarkeit der Lithium-Ressourcen im Hinblick auf den zukünftigen Ausbau der Elektromobilität und anderer Anwendungen anhand verfügbarer Studien analysiert. Im Fokus der Auswertung stand das Verhältnis von Angebot und Nachfrage im Zuge einer Gegenüberstellung der Höhe der weltweit identifizierten Lithium-Reserven und -Ressourcen und der installierten und geplanten Produktionskapazitäten sowie der steigenden Nachfrage bedingt durch den prognostizierten Ausbau der Elektromobilität und anderer Anwendungen. Weiterhin wurden die wesentlichen Risiken, die sich für die vom Rohstoff Lithium abhängige Industrie ergeben könnten, identifiziert und analysiert. Dazu zählen z. B. eine Versorgungslücke, damit zusammenhängende Preissteigerungen und die vorherrschende geopolitische Situation.

Die Ergebnisse zeigen, dass heute ausreichend identifizierte Lithium-Quellen vorhanden und genügend neue Produktionskapazitäten für Lithium geplant sind, um eine zukünftige Produktion von Elektrofahrzeugen für viele Jahre versorgen zu können. Das Risiko einer Versorgungslücke besteht dabei vor allem durch die lange Vorlaufzeit beim Aufbau neuer Produktionsstandorte sowie aufgrund der geopolitischen Situation. Um die Auswirkungen steigender Rohstoffkosten zu verringern, die Rohstoffversorgungssicherheit zu erhöhen und die Chancen für die Wirtschaft zu verbessern, sind weitergehende Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig. Im Fokus stehen die Optimierung der Lithium-Ionen-Technologie, die Entwicklung des Recyclings mit der Etablierung einer Kreislaufwirtschaft sowie die langfristige Erforschung neuer Batterietechnologien.

// Contact

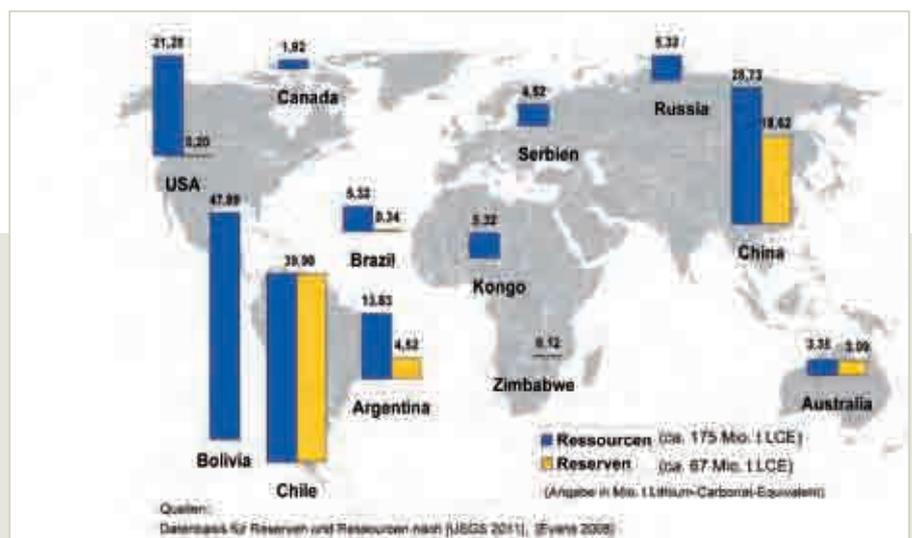
Dipl.-Chem. oec Benjamin Schott
E-Mail: benjamin.schott@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-294

// Aufteilung der identifizierten Lithium-Reserven und Lithium-Ressourcen nach Ländern
// Distribution of identified lithium reserves and resources according to countries

// Analysis of lithium's availability as a raw material

As electromobility develops worldwide along with the associated growing market for lithium-ion batteries, the availability of lithium as a raw material is being increasingly discussed and questioned. Based on available studies, ZSW's Systems Analysis research department therefore analysed the availability of lithium resources with a view to the future expansion of electromobility and other applications. The evaluation focussed on the supply and demand relationship in comparing the volume of lithium reserves and resources identified worldwide with not just the installed and planned production capacities but also the increasing demand caused by the forecast expansion of electromobility and other applications. In addition, the main risks were also identified and analysed that could have an impact on the lithium-dependent industry, such as supply gaps, associated price increases and the prevailing geopolitical situation.

The results show that a sufficient number of identified lithium sources are available today and sufficient production capacities are planned for lithium to supply a future production of electric vehicles for many years. There is a particular risk of a supply gap, however, as a result of the long inception period when constructing new production sites and the geopolitical situation. In order to reduce the impact of increasing raw material costs while increasing the supply security for raw materials and improving the opportunities for business, more extensive research and development efforts will be necessary. The focus is on optimising the lithium-ion technology, developing recycling with the establishment of a circular flow economy and long-term research on new battery technologies.



// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

// Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschicht-Technologien bietet ein hohes Potenzial zur Kostensenkung für photovoltaische Solarmodule. Speziell die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende Technologie (CIGS) hat sich mit hohen Wirkungsgraden und einer hoch entwickelten Fertigungstechnologie in der industriellen Produktion bewährt.

Das CIGS-Technikum bildet den Schwerpunkt der apparativen Ausstattung des ZSW-Fachgebietes MAT. Es umfasst alle Maschinen und Anlagen, die erforderlich sind, um Dünnschicht-Solarmodule in allen Arbeitsschritten von der Vorbereitung der Glassubstrate bis hin zur Befestigung von Anschlusskabeln zu fertigen. Die Anlagen sind im Unterschied zum Laborbetrieb bereits weitgehend für Durchlaufprozesse ausgelegt, sodass eine große Nähe zu industriellen Verfahren gegeben ist (Arbeitsgruppe FACIS). Für den Einsatz von flexiblen Substratmaterialien anstelle des Glassubstrates wurde ein zweites Technikum für eine Rolle-zu-Rolle-Beschichtung von flexiblen CIGS-Modulen aufgebaut (Arbeitsgruppe FLEXIS).

Neue kostengünstige Depositionsverfahren wie Drucktechnologien werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme weiterentwickelt (Arbeitsgruppe NEMA). Die langjährigen Erfahrungen des MAT-Teams in der Entwicklung von CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen fließen in Dienstleistungen für die Industrie ein: Im Kundenauftrag übernehmen wir vielfältige Analytikaufgaben (hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie, Oberflächen- und Röntgenfluoreszenzanalyse), Beschichtungen (metallische Kontaktschichten und transparent-leitfähige Schichten), Kennlinienmessungen sowie Stabilitätstests an Verkapselungsmaterialien.

// Our Main Focus

The use of thin-film technologies offers considerable potential for reducing the costs of photovoltaic solar modules. Particularly the copper, indium, gallium and selenium-based technology (CIGS) has proved itself in industrial production with high efficiencies and a highly developed production technology.

The CIGS technical lab is the heart of the MAT laboratory. It encompasses all machines and equipment required to produce complete thin-film solar power modules in all working steps, ranging from glass substrate conditioning to connecting lead cables. In contrast to laboratory operation, the systems are already largely designed for in-line processing so that there is a close proximity to industrial processes (FACIS group). A pilot line for the roll-to-roll coating of flexible CIGS modules has been established for deploying flexible substrate materials instead of glass substrates (FLEXIS group).

New cost-effective deposition processes such as print technologies are being developed for new organic and inorganic photovoltaic semiconductor systems (NEMA 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 analytical support (high-resolution scanning electron microscopy, surface and x-ray fluorescence analysis), coatings (metal contact layers and transparent conductive layers), characteristic curve measurements and stability tests on encapsulation materials.



// Contact

Dr. Wiltraud Wischmann

E-Mail: wiltraud.wischmann@zsw-bw.de

Phone: +49 (0)711 78 70-256

// Steigerung der Wirkungsgrade für CIGS-Dünnschicht-Solarzellen

Increasing the Efficiency of CIGS Thin-Film Solar Cells

// Optimierung des CIGS-Absorbers

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Dünnschicht-Technologien gegenüber der kristallinen Silizium-Technologie zu erhöhen, müssen durch eine weitere Wirkungsgradsteigerung die Kosten gesenkt werden. Im Vergleich aller Dünnschicht-Technologien weist das CIGS-Materialsystem (Kupfer-Indium-Gallium-Selen) heute die höchsten Effizienzen auf.

Da die Herstellung des CIGS-Absorbers einer der kostenbestimmenden Fertigungsschritte in einer Produktion ist, kommt seiner Optimierung eine große Bedeutung zu. Unsere CIGS-Prozesse, die auf einer Koverdampfung der Elemente Cu, In, Ga und Se basieren, werden sowohl in einer Laboranlage an Zellen mit einer Fläche von $0,5 \text{ cm}^2$ als auch auf einer industrienahen Durchlaufanlage mit bis zu $30 \times 30 \text{ cm}$ Fläche kontinuierlich verbessert.

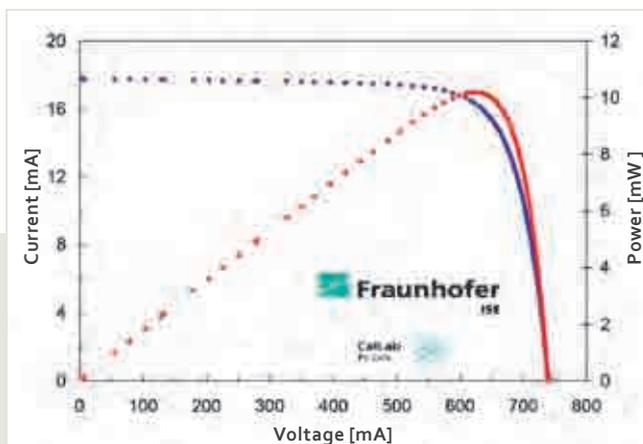
Nach dem Europarekord des Vorjahres von 19,6% auf einer industrienahen Durchlaufanlage lag 2010 der Schwerpunkt auf einer detaillierten Untersuchung von weiteren Einflussgrößen, die in einer Laboranlage in einem statischen Prozess gezielt variiert wurden. Dies führte zu einem Weltrekordwert von 20,1% und kurz darauf 20,3% (Fläche $0,5 \text{ cm}^2$) für das Materialsystem CIGS bzw. für die Dünnschicht-Technologien insgesamt. Die zugehörige Kennlinie zeigt die Abbildung unten. Hiermit ist der Anschluss an die multikristalline Silizium-Welt fast gelungen (Rekordwerte liegen dort bei 20,4%).

// Optimising the CIGS absorber

In order to increase the competitiveness of thin-film technologies relative to crystalline silicon technology, the costs must be reduced by increasing the efficiency even more. In comparison with all thin-film technologies, the CIGS material system (copper-indium-gallium-selenium) now has the greatest efficiency.

Because the manufacture of CIGS absorbers is one of the major cost drivers in the production process, it is particularly important that it is optimised. Our CIGS processes, which are based on co-evaporating the elements Cu, In, Ga and Se, are being continually improved both in a laboratory system using cells with 0.5 cm^2 surface areas and in an industrial-scale throughput system with up to $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ cell surface areas.

After the European record of 19.6% in 2009, using an industrial-scale throughput process, in 2010 we focussed in detail on investigating further influencing variables, which were specifically varied in a laboratory system by means of a static process. This led to new world record values of 20.1% and, shortly afterwards, 20.3% (0.5 cm^2 surface area) for the CIGS material system and for thin-film technologies as a whole. The figure below shows the respective characteristic curve. We have therefore almost caught up with the multicrystalline silicon world (which has record values of around 20.4%).



Certified result
(30 June 2010):

With AR-Coating (MgF_2)

$V_{oc} = 740 \text{ mV}$

$J_{sc} = 36.33 \text{ mA/cm}^2$

$FF = 77.5 \%$

$\eta = 20.3 \pm 0.6\%$

$A = 0.50 \text{ cm}^2$

// Contact

Dr. Wiltraud Wischmann

E-Mail: wiltraud.wischmann@zsw-bw.de

Phone: +49 (0)711 78 70-256

// I/U-Kennlinie der Weltrekordzelle ($0,5 \text{ cm}^2$ Fläche/mit Antireflexschicht).

// Certified IV characteristic of ZSW world record cell (area of 0.5 cm^2 /with anti-reflexive coating).

// Optimierung von Funktionsschichten

Optimising Functional Layers



// Optimierung des Heterokontakts

Für eine bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums im kurzwelligen Bereich wurde der n-Kontakt modifiziert, indem das Materialsystem Kadmiumsulfid/Zinkoxid ($\text{CdS}/\text{i-ZnO}$) durch Zinksulfid/Zink-Magnesium-Oxid (ZnS/ZnMgO) ersetzt wurde. Wesentliche Fortschritte gelangen in der für eine industrielle Umsetzung notwendigen Verkürzung der Reaktionszeiten. Dabei konnten bereits beste Zellen mit einem Wirkungsgrad von $> 18\%$ hergestellt werden.

// Optimising the heterojunction

For improved exploitation of the solar spectrum in the short-wave range, we modified the n-contact by replacing the cadmium sulphide/zinc oxide ($\text{CdS}/\text{i-ZnO}$) material system with zinc sulphide/zinc magnesium oxide (ZnS/ZnMgO). We achieved considerable progress in shortening the reaction times necessary for industrial implementation, whereby we have already succeeded in achieving cells with an efficiency $> 18\%$.



// Nasschemische Abscheidung von ZnS-Schichten auf die CIGS-Schicht mit unterschiedlichen Beschichtungsparametern: Das Bild zeigt die Verbesserung von einer schlechten zu einer guten Schichtbedeckung.

// Wet-chemical deposition of ZnS layers on top of the CIGS layer with different deposition parameters: The image shows the improvement from weak to good coverage of the layer.

// Optimierung der TCO-Schicht

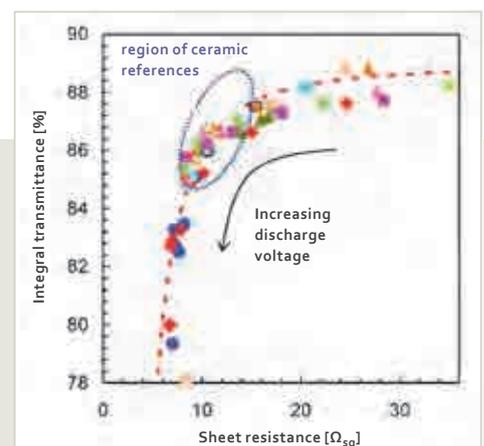
Erfolgreiche Weiterentwicklungen der vollreaktiven Abscheidung von ZnO:Al-Fensterschichten wurden in Zusammenarbeit mit einem Anlagenbauer erreicht. Die großflächige Abscheidung von metallischen Zn:Al-Rohrtargets eröffnet aufgrund der viel geringeren Targetherstellkosten ein großes Kosteneinsparpotenzial. Eine gute Reproduzierbarkeit und Prozess-Stabilität konnte in verschiedenen Versuchsreihen mit jeweiliger Variation der Sauerstoff- bzw. Entladespannungsarbeitspunkte nachgewiesen werden. Im optimalen Arbeitspunkt wurde nahezu vergleichbare TCO-Qualität (TCO = transparent conductive oxide, transparent-leitfähiges Oxid) der reaktiv gesputterten Schichten mit den Standardschichten von keramischen ZnO:Al-Planartargets erreicht. Die Anwendung in CIGS-Modulen zeigte mitunter höhere Wirkungsgrade mit reaktiv gesputterter TCO-Schicht – auch mit Cd-freien Pufferschichten – verglichen mit keramischem TCO sowie vergleichbar gute Stabilität bei beschleunigten Alterungstests (z. B. Feuchte-Wärme).

// Optimising the TCO layer

We successfully improved the full-reactive deposition of ZnO:Al window layers in collaboration with a plant constructor. Because of the much smaller target manufacturing costs, the large-scale deposition of metallic Zn:Al rotatable targets opens up considerable savings potential. Its good reproducibility and process stability were able to be proved in various test series. At the optimum operating point, the TCO quality (TCO = transparent conductive oxide) of the reactive-sputtered layers was almost comparable to that of standard layers with ceramic ZnO:Al planar targets. The use in CIGS modules sometimes showed higher efficiencies with reactive-sputtered TCO layers – including with Cd-free buffer layers – when compared to ceramic TCO, and similarly good stability with accelerated ageing tests (e.g. moisture-heat).

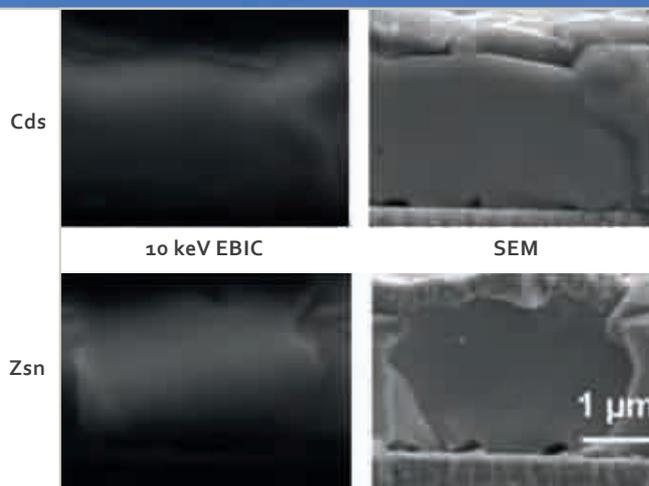
// Transparent-leitfähige Schichten als Kontaktschichten für Dünnschicht-Solarzellen. Das Bild zeigt das Verhältnis der durchschnittlichen integralen Transmission gegenüber dem Schichtwiderstand für verschiedene Optimierungsserien. Die Variation des Arbeitspunkts vom oxidischen (rechts) zum metallischen Sputtern (links) sowie das Gebiet vergleichbarer TCO-Filme aus keramischen Targets sind angezeigt.

// Transparent, conductive films as contact layers for thin-film solar cells. The image shows the relation of the averaged integral transmission versus the sheet resistance as obtained for various optimisation series. Variation with working point from oxidic (right) to metallic sputtering (left) is indicated as well as the region of comparable TCO films from ceramic targets.



// Analytische Verfahren

Analytical Methods



// EBIC-Messverfahren

Mit dem EBIC-Messverfahren (Electron Beam Induced Current) an Bruchkanten von Cu(In,Ga)Se₂-Solarzellen können ortsaufgelöste Untersuchungen der Stromsammleigenschaften durchgeführt werden. Die Abbildung zeigt die EBIC-Bilder von Cu(In,Ga)Se₂-Solarzellen mit den Puffersystemen CdS/i-ZnO (oben) sowie ZnS/(Zn,Mg)O (unten) und deren zugehörige REM-Bilder (Rasterelektronenmikroskop). Helle Punkte im EBIC-Bild entsprechen einem hohen Strom bei Einstrahlung am entsprechenden Ort. Die Raumladungswerte ist für Solarzellen mit ZnS/(Zn,Mg)O-Puffersystem größer als für Zellen mit CdS/i-ZnO-Puffer.

// Raman-Mikroskopie

Die zerstörungsfreie Methode der Raman-Mikroskopie bietet die Möglichkeit, Inhomogenitäten auf der Mikrometerskala innerhalb der Cu(In,Ga)Se₂-Schicht aufzulösen. In der Abbildung unten ist die laterale Verteilung des Raman-Signals von Cu_{2-x}Se innerhalb einer Cu-reichen Cu(In,Ga)Se₂-Schicht abgebildet. Die Cu_{2-x}Se-Domänen erstrecken sich über 1–2 μm große Bereiche, die sich in der typischen Größenordnung der Korngrößen bewegen. Blaue Bereiche sind Stellen auf der Probe, an denen kein Cu_{2-x}Se-Signal detektierbar ist. Die rechte Abbildung unten stellt die Entwicklung der Raman-Spektren entlang des eingezeichneten Pfeils innerhalb der linken Abbildung dar. Am Anfang des Line-Scans tritt ausschließlich das Raman-Signal von Cu(In,Ga)Se₂ auf. Bei den weiteren Spektren handelt es sich um eine Mischung der beiden Signale von Cu_{2-x}Se und Cu(In,Ga)Se₂.

// EBIC-Bild bei 10 keV und REM-Bild an einer Bruchkante einer Cu(In,Ga)Se₂-Solarzelle mit CdS/i-ZnO (oben) sowie ZnS/(Zn,Mg)O (unten) als Puffersystem. Das Maximum des EBIC-Signals ist für die CdS/i-ZnO-Zellen nahe an der Puffer-/Cu(In,Ga)Se₂-Grenzfläche, dagegen ist es für ZnS/(Zn,Mg)O-Zellen mehr ins Cu(In,Ga)Se₂-Volumen verschoben.

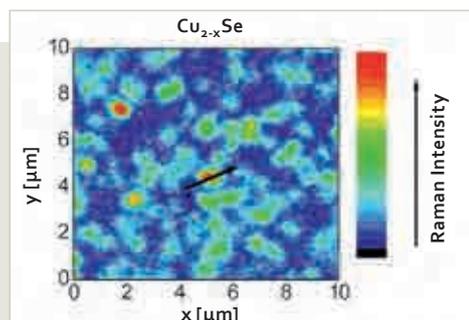
// Image made with EBIC at 10 keV (left) and SEM (right) at a breaking edge of a Cu(In,Ga)Se₂ solar cell with a buffer system of CdS/i-ZnO (above) and ZnS/(Zn,Mg)O (below). The maximum of the EBIC signal for the CdS/i-ZnO cells is close to the boundary layer of buffer and Cu(In,Ga)Se₂, while for the ZnS/(Zn,Mg)O cells it is moved into the volume of the Cu(In,Ga)Se₂ layer.

// EBIC measurement processes

Using the EBIC (Electron Beam Induced Current) measurement process on the broken edges of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells enables spatially resolved investigations to be made of the current collection properties. The figure above shows the EBIC images of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with the CdS/i-ZnO (above) and ZnS/(Zn,Mg)O (below) buffer systems and their respective SEM images (scanning electron microscope). The bright points in the EBIC image correspond to a high level of current when there is irradiance at the corresponding location. The space charge range is greater for solar cells with a ZnS/(Zn,Mg)O buffer system than for cells with a CdS/i-ZnO buffer.

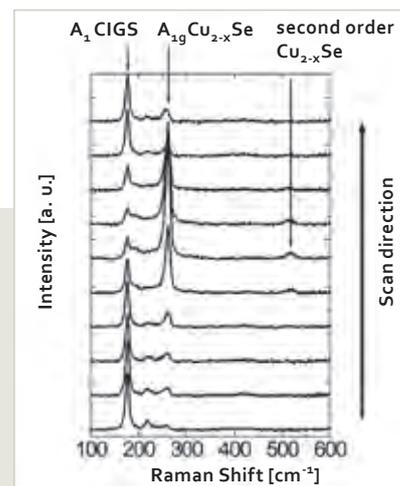
// Raman microscopy

The destruction-free method provided by Raman microscopy makes it possible to resolve inhomogeneities at a micrometre-scale within the Cu(In,Ga)Se₂ layer. The figure below (left) depicts the lateral distribution of the Raman signal for Cu_{2-x}Se within a Cu-rich Cu(In,Ga)Se₂ layer. The Cu_{2-x}Se domains extend across 1–2 μm areas that have the typical magnitude of the grain sizes. Blue areas are points on the sample in which no Cu_{2-x}Se signals can be detected. The figure below (right) depicts the development of the Raman spectra along the arrow shown in the figure above (left). Only the Raman signal for Cu(In,Ga)Se₂ occurs at the beginning of the line scan. The other spectra consist of a mixture of both the Cu_{2-x}Se and Cu(In,Ga)Se₂ signals.



// Links: Raman-Mapping der Größe 10 x 10 μm² an einer Cu-reichen Cu(In,Ga)Se₂-Schicht. Die Intensitätsverteilung der Raman-Mode des Cu_{2-x}Se um den Bereich 260 cm⁻¹ ist dargestellt. Rechts: Entwicklung der Raman-Spektren entlang des eingezeichneten Pfeils.

// Raman-mapping (left) of a 10 x 10 μm cell at a Cu-rich Cu(In,Ga)Se₂ layer. The image depicts the distribution of intensity of the Raman mode of Cu_{2-x}Se around 260 cm⁻¹. Right: Development of the Raman spectra along the indicated direction.



// CIGS-Dünnschicht-Solarzellen auf Polymerband

CIGS Thin-Film Solar Cells on Polymer Film

In der Ende 2009 am ZSW aufgebauten Rolle-zu-Rolle-Bandbeschichtungsanlage werden seit Anfang 2010 CIGS-Dünnschicht-Solarzellen auf einer 25 µm dünnen und 30 cm breiten Kunststoff-Folie abgeschieden. Die Besonderheit der 12 m langen „integrierten“ Anlage liegt darin, dass alle Beschichtungsschritte simultan im gleichen Vakuum stattfinden. Während also an einem Ende der Anlage der Rückkontakt mittels Kathodenzerstäubung aufgebracht wird, findet an anderer Stelle die CIGS-Absorberaufdampfung und die Abscheidung der transparenten Frontkontaktschicht statt. In der aktuellen Ausbaustufe können der Molybdän-Rückkontakt, der CIGS-Absorber sowie die ZnO-Fensterschichten abgeschieden werden. An der Entwicklung und Integration einer kadmiumfreien Pufferschicht wird noch gearbeitet. Zu einem späteren Zeitpunkt soll auch die monolithische Zellverschaltung voll integriert werden.

Die Aktivitäten konzentrierten sich 2010 auf die Optimierung des Wickelmechanismus unter Prozessbedingungen sowie auf die Abscheidung einer rissfreien, gut haftenden und ausreichend leitfähigen Rückkontaktschicht und auf die Koverdampfung. Der CIGS-Absorber wurde bei Substrattemperaturen um 450 °C optimiert. Eine besondere Herausforderung bildete dabei die optimale Natriumdotierung des CIGS-Halbleiters, der aufgrund der eingeschränkten maximalen Substrattemperaturen auf Polymerband eine erhöhte Bedeutung zukommt. In einem ersten Anlauf ohne Natrium konnten dabei Zellwirkungsgrade von 3 – 4 % erzielt werden. Mit einer Na-Dotierschicht, die ebenfalls im Rolle-zu-Rolle-Verfahren vor der CIGS-Beschichtung auf den Rückkontakt aufgebracht wurde, konnte hingegen schon ein Zellwirkungsgrad von 8,1% realisiert werden. Die Zellfertigstellung, also die Abscheidung der Puffer- sowie der ZnO-Fensterschicht, erfolgte auf konventionellen „Inline“-Anlagen.

On the roll-to-roll band coating system installed at ZSW at the end of 2009, CIGS thin-film solar cells have been deposited on a 25-µm-thin and 30-cm-wide plastic film since the beginning of 2010. The unique feature of this 12-metre-long “integrated” system is that all coating steps take place simultaneously in the same vacuum. While the back contact is applied at one end of the system by means of cathode sputtering, the co-evaporation of the CIGS absorber and the deposition of the transparent front contact layer take place at other points. In the current development stage, the molybdenum back contact, CIGS absorber and ZnO window layers can be deposited. Work is still being conducted on developing and integrating a cadmium-free buffer layer. The monolithic cell connection will also be fully integrated at a later point in time.

In 2010, the activities concentrated on optimising the winding mechanism under process conditions, on depositing a crack-free, well-adhering and sufficiently conductive back contact layer, and on co-evaporation. The CIGS absorber was optimised with substrate temperatures of around 450 °C. A particular challenge in this respect was the optimum sodium doping of the CIGS semiconductor, which, because of the limited maximum substrate temperature on the polymer film, has heightened significance. In a first attempt without sodium, cell efficiencies of 3–4% were achieved. A cell efficiency of 8.1% has, however, already been achieved with a sodium-doped layer that was likewise applied to the back contact in the roll-to-roll process before the CIGS coating. The cell production, i.e. the deposition of the buffer and the ZnO window layer, was finished on conventional inline systems.



// Blick in die Aufrollkammer der Rolle-zu-Rolle-Anlage am ZSW.
// View of the rolling-up chamber in the roll-to-roll plant at ZSW.

// Neue Materialien für die Photovoltaik

New Materials for Photovoltaics

// Nanopartikeläre Ausgangsschichten für druckbare CIGS-Solarzellen

Das besondere Interesse bei kostengünstigen, vakuumfreien Beschichtungsmethoden gilt Nanopartikeln in Suspension, die nach der Auftragung in einem sequenziellen Heizprozess unter Selen-Atmosphäre zur gewünschten Chalkopyrit-Halbleiterstruktur umgewandelt werden. Die Materialausbeute ist deutlich höher, und Druckprozesse sind in der Industrie weit verbreitet und leichter hochskalierbar.

Das ZSW untersucht im Verbund mit anderen Partnern unterschiedliche Ausgangsnanopartikel mit den benötigten Elementen Kupfer, Indium und Gallium und erprobt verschiedene Beschichtungstechniken wie das Rakeln der Suspensionen (siehe Abb. links unten). Die fertig selenisierten Schichten werden zu kompletten Solarzellen vervollständigt und erzielen bereits ermutigende Ergebnisse, auch wenn die Schicht noch ihren partikulären Ursprung deutlich erkennen lässt (siehe Querschnittsaufnahme rechts unten).

// Organische Solarzellen: ITO-Ersatz durch hochleitfähiges PEDOT

Organische Solarzellen stoßen vor allem aufgrund des Vorteils einer preiswerten, großflächigen und vakuumfreien Herstellung auf großes Interesse. Dazu ist es dringend notwendig, kostengünstige Alternativen zu transparenten Anoden aus Indiumzinnoxid (ITO) zu finden, die keine kostenintensive Abscheidung im Vakuum benötigen.

Das ZSW versucht daher, das ITO durch organische Polymer-schichten zu ersetzen, die durch einfache Beschichtungstechniken aufgetragen werden können. Hierzu wird die Leitfähigkeit des bereits hochleitfähigen PEDOT-Polymers durch Zusätze weiter gesteigert. Dabei zeigen Leitfähigkeit und Transparenz der Schichten in Abhängigkeit von der Schichtdicke ein diametrales Verhalten. Dennoch konnten organische Solarzellen mit PEDOT-Anoden mit im Vergleich zu Zellen mit ITO-Anoden nur geringfügig reduzierten Effizienzen realisiert werden.

// Unterschiedliche Schichtdicken mit zunehmender Transparenz.
// Increasingly transparent layers of varying thickness.

// Nanoparticle precursor layers for printable CIGS solar cells

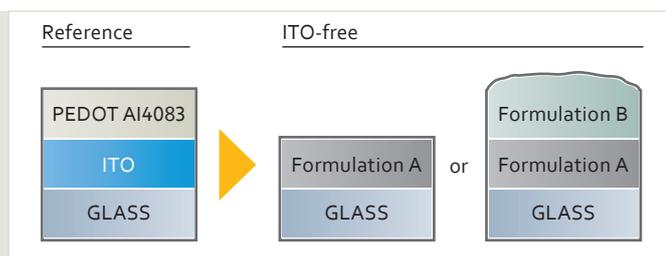
A particular focus with regard to cost-effective vacuum-free coating methods is on nanoparticles in suspension, which after being applied in a sequential heating process within a selenium atmosphere are converted into the desired chalcopyrite semiconductor structure. The material yield is considerably greater and print processes are widespread in industry and can be scaled upwards relatively easily.

In conjunction with other partners, ZSW is investigating different precursor nanoparticles with the required elements copper, indium and gallium, and is testing various coating technologies such as applying suspensions with a squeegee (see below left). The fully selenised layers are completed to form solar cells and are already achieving encouraging results, even if the layers still clearly reveal their particulate origins (see cross-sectional image below right).

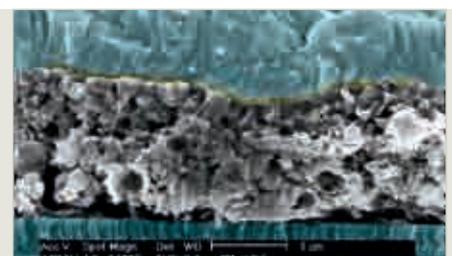
// Organic solar cells: ITO replaced with highly conductive PEDOT

Primarily because of their cost-effective, large-scale and vacuum-free production, organic solar cells have generated considerable interest, whereby there is an urgent need to find cheap alternatives to transparent anodes made of indium tin oxide (ITO) that do not require cost-intensive deposition in a vacuum.

ZSW is therefore attempting to replace the ITO with organic polymer layers that can be applied with simple coating technologies. For this purpose, the conductivity of the already highly conductive PEDOT polymer has been increased further with additives. The layers' conductivity and transparency display diametrical behaviour depending on the layer thickness. Nevertheless it has been possible to produce organic solar cells with PEDOT anodes that, in comparison with cells with ITO anodes, have only slightly reduced efficiencies.



// Querschnitt einer CIGS-Solarzelle basierend auf Nanopartikel-Tinten.
// Cross-section through a CIGS solar cell based on nanoparticle inks.



// Ersetzen der ITO-Anode durch hochleitende PEDOT-Schicht bzw. Schichtstapel.
// Replacement of the ITO anode with a highly conductive PEDOT layer or layer stack.

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

// Unsere Kernkompetenzen

Auf dem Solar-Testfeld Widderstall werden vergleichende Untersuchungen zu Leistung und Ertrag sowie zur Langzeitstabilität von Photovoltaikmodulen und -systemen unter realen Betriebsbedingungen durchgeführt. Darüber hinaus wird die Modulstabilität auch durch beschleunigte Alterungsexperimente überprüft. Dazu führen die Spezialisten des Fachgebiets MSA in Labor- und Freifeldexperimenten Untersuchungen an Photovoltaikmodulen unter Extrembelastungen (Temperatur, Feuchte, Spannung, Einstrahlung etc.) durch. Resultate aus beschleunigten Alterungstests werden mit Degradationseffekten unter normalen Betriebsbedingungen korreliert und mit materialwissenschaftlichen Verfahren (Oberflächenanalyse, Rasterelektronenmikroskopie etc.) genau analysiert. Das Modultestlabor **Solab** bietet hier spezialisiertes Know-how insbesondere im Bereich der Dünnschicht-Technologien.

Weitere Arbeitsgebiete sind die Optimierung der Netzeinbindung von Photovoltaiksystemen in Verbindung mit elektrochemischen Speichern, Feldtests von Photovoltaik-Batterie-Systemen und die Gebäudeintegration von Photovoltaikmodulen.

Zur Beratungskompetenz des Fachgebiets gehören Prüfungen von geplanten Großanlagen im Auftrag finanzierender Banken („due diligence“) sowie Standortbewertungen, Auslegungen von Photovoltaiksystemen, Ertragsgutachten und die Qualitätskontrolle von Photovoltaikanlagen.

// Our Main Focus

At the Widderstall solar test field, comparative tests are being performed under realistic operating conditions to investigate the performance, yields and long-term stability of photovoltaic modules and systems. In addition, the module stability is being checked by means of accelerated ageing experiments. For this purpose, specialists from the MSA research department are conducting laboratory and field experiments on photovoltaic modules under extreme load (temperature, humidity, voltage, irradiance, etc.). The results from the accelerated ageing tests are correlated with degradation effects under normal operating conditions and precisely analysed using material science-based procedures (surface analysis, scanning electron microscope, etc.). The **Solab** module test laboratory offers specialist expertise here, particularly in the field of thin-film technologies.

Further work areas include optimising the integration of photovoltaic systems into the power grid in conjunction with electrochemical storage systems, field tests of photovoltaic battery systems and the integration of photovoltaic modules in buildings.

The research department's consultancy expertise includes testing planned large-scale systems on behalf of investing banks (due diligence) as well as site assessments, designing 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

// Charakterisierung von Dünnschicht-Solarmodulen

Characterisation of Thin-Film Solar Modules

// Messung des Betriebsverhaltens in Labor und Freifeld

Auf dem Solar-Testfeld Widderstall werden Photovoltaik-Anlagen und Einzelmodule verschiedener Technologien eingehend untersucht. Jedes Testmodul ist an einem separaten Mess-Schaltkreis zur periodischen Aufzeichnung der I/U-Kennlinie angeschlossen. Zwischen den Kennlinienmessungen wird das Modul im Punkt maximaler Leistung gehalten. Die Auswertung der Einzelmessungen gestattet eine Charakterisierung des Moduls über den gesamten Betriebsbereich.

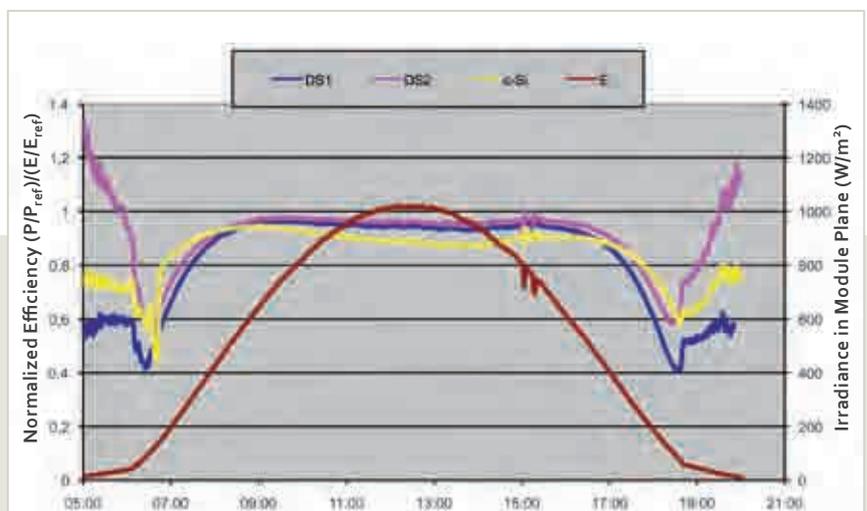
Eine Analyse des Betriebsverhaltens berücksichtigt Betriebsbedingungen wie Bestrahlungsstärke, Modultemperatur, Spektralverteilung und Einfallswinkel. Hinzu kommen modulbezogene Effekte durch jahreszeitliche Metastabilitäten und Langzeit-Degradationseffekte. Die Bestimmung aller Koeffizienten bzw. funktionalen Zusammenhänge durch Labormessungen erfordert einen extremen experimentellen Aufwand. Diese Kenngrößen lassen sich aber auch aus Freifeld- mit Labormessungen unter senkrechtem Einfall und mit AM-1.5- Spektrum kann eine effektive Bestrahlungsstärke definiert werden, die den gemessenen Kurzschluss-Strom des Moduls in Bezug setzt zum Kurzschluss-Strom unter Referenzspektrum und senkrechtem Einfall (Selbstreferenzierung). Das typische Betriebsverhalten verschiedener Technologien lässt sich gut am Tagesprofil eines klaren Sommertages verdeutlichen: Frühmorgens steht die Sonne noch hinter der Modulebene – daher empfangen die Module nur diffuses Licht. Dabei kann der normierte Wirkungsgrad bei Modulen mit sehr guter Schwachlichtempfindlichkeit sogar größer als eins werden (siehe Abb.: Kurve DS2). Steigt die Sonne vor die Modulebene, wird der Wirkungsgrad durch den kombinierten Effekt von flachem Einfallswinkel und Schwachlichtempfindlichkeit dominiert. Mit ansteigender Modultemperatur und steileren Einfallswinkeln dominiert der Temperatureffekt (Kurven DS1 und DS2). In den Abendstunden verläuft der Wirkungsgrad spiegelbildlich zu den Morgenstunden.

// Tagesprofile verschiedener Photovoltaik-Technologien
// Diurnal profiles of various photovoltaic technologies

// Measuring module behaviour in the lab and outdoors

At the Widderstall solar testing facility, each module is connected to a separate measuring circuit in order to periodically record its IV characteristic curve. Between the IV measurements, each module is maintained at its maximum power point. Evaluating the individual measurements enables the modules to be characterised across the entire operating range.

The factors influencing module output are external operating conditions, including irradiance, module temperature, spectral distribution and angle of incidence. Other module-related effects are caused by seasonal metastabilities and long-term degradation effects. Instead of elaborate laboratory tests, the corresponding parameters may be derived from long-term IV measurements. In order to compare field with laboratory measurements with vertical incidence and an AM 1.5 spectrum, an effective irradiance can be defined that relates the module's measured short-circuit current to the short-circuit current under a reference spectrum and vertical incidence (self-referencing). The typical operating behaviour of various technologies can be easily depicted with the diurnal profile for a clear summer day: In the early morning, the sun is still behind the module level – under such diffuse light, the normalised efficiency of modules with very good low-light sensitivity can even be greater than one (see fig.: DS2 curve). As soon as the sun turns in front of the module level, the efficiency is dominated by the flat angle of incidence and the low-light sensitivity. Later on in the day, the temperature effect begins to dominate (DS1 and DS2 curves). During the evening, the course of the efficiency is a mirror image of the morning.



// 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 wie Biomasse über die Erzeugung von Wasserstoff bzw. eines wasserstoffreichen Gases hoch-effizient 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 Gasprozessstechnik ist die Erzeugung eines brennstoffzellentauglichen Gases, eines Brenngases für die konventionelle Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstoff-erzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

REG-Schwerpunkthemen sind:

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

// 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 like biomass

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 conventional electricity generation, a conditioned synthesis gas for fuel production, and a substitute natural gas to be distributed via the natural gas grid.

REG focuses on:

- > thermochemical conversion of biomass
- > fuel reforming / fuel synthesis
- > innovative energy storage concepts for renewable electricity (“Power-to-Gas”)



// Contact

Dr. Michael Specht

E-Mail: michael.specht@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-218

// Biomass-to-Gas (BtG)

// REG-Expertise: Biomass-to-Gas (BtG)/ Materialcharakterisierung

Um den Transfer der Biomassevergasung nach dem am ZSW entwickelten AER-Verfahren (Absorption-Enhanced Reforming) in den Industriemaßstab vorzubereiten und technisch zu unterstützen, wurde die Laborinfrastruktur in den zentralen Tätigkeitsfeldern „Charakterisierung von Wirbelschichtbettmaterialien“ und „Brennstoff-Flexibilisierung“ erweitert. Für die Eignung von CO₂-Sorbenzien als Wirbelschichtbettmaterial für den AER-Prozess ist die mechanische Abriebfestigkeit der Partikel mit einem Durchmesser von 0,5 bis 1,5 mm entscheidend, die zunächst in einem Kugelmühlentest qualitativ geprüft wird. Vertiefende Untersuchungen vielversprechender Materialien werden in Labor-Wirbelschichtreaktoren (bis 900 °C, 1 atm) durchgeführt. In einer neuen Zweibett-Wirbelschicht-Testplattform („Dual Fluidised Bed/Chemical Looping“) zirkuliert das CO₂-Sorbenz zwischen zwei Reaktoren, die einen Versuchsbetrieb unter AER-spezifischen Prozessbedingungen (z. B. Zirkulationsrate, Temperatur und Gasatmosphäre) und somit eine realitätsnahe Materialbeanspruchung erlauben. Zur Versuchsvorbereitung bzw. Nachbereitung wird die Veränderung der Partikelgrößenverteilung mit einem Laserbeugungsmessgerät als Maß für die mechanische Festigkeit ermittelt.

Die Thermogravimetrie (TGA) dient der Analyse der CO₂-Aufnahmefähigkeit hinsichtlich Zyklusstabilität und Reaktionsgeschwindigkeit der CO₂-Sorbenzien. Hierfür steht eine neue Magnetschwebewaage zur Verfügung, mit welcher neben dem CO₂-Sorptionverhalten auch die Biomassekonversion sowie katalytische Reaktionen (z. B. Methanisierung eines AER-Gases) bei Temperaturen bis zu 1200 °C und Drücken bis zu 40 bar untersucht werden können. Bei der energetischen Nutzung von Holzersatz-Brennstoffen wie Stroh schränkt das Ascheschmelzverhalten die Nutzbarkeit in der Regel stark ein. Um günstige Betriebsbedingungen für den AER-Prozess zu identifizieren, wird das Agglomerationsverhalten verschiedener Wirbelschichtbettmaterial-Zusammensetzungen (Asche, Sorbenz, Additiv) im Temperaturbereich bis zu 1300 °C mit einem Rotationsviskosimeter ermittelt.

// Prinzip des AER-Prozesses: Für die kontinuierliche Herstellung eines H₂-reichen Produktgases werden zwei Wirbelschichtreaktoren miteinander gekoppelt, zwischen denen ein CO₂-sorptives Bettmaterial zirkuliert. Dieses transportiert Wärme in den Vergaser und trennt dort bei Temperaturen kleiner 800 °C zusätzlich CO₂ ab. Im zweiten Reaktor wird Biomassekoks verbrannt, um das Bettmaterial zu erwärmen und zu regenerieren (CO₂-Freisetzung).

// Principle behind the AER process: In order to continually generate an H₂-rich product gas, two fluidised bed reactors are combined with each other, between which a CO₂-sorptive bed material is circulated. This transports heat into the gasification unit where it separates additional CO₂ at temperatures less than 800 °C. Biomass coke is burnt in the second reactor in order to heat and regenerate the bed material (releasing CO₂).

// REG expertise: Biomass-to-Gas (BtG)/ material characterisation

In order to support the transfer of AER biomass gasification to an industrial scale the laboratory infrastructure was expanded in the R&D topics "characterisation of fluidised bed materials" and "fuel flexibilisation". To determine the suitability of CO₂ sorbents as bed material for the AER process, the mechanical attrition resistance is decisive, which is first of all qualitatively tested with a ball mill. More in-depth investigations of highly promising materials are conducted in bench-scale fluidised bed reactors (up to 900 °C, 1 atm). The new "Dual Fluidised Bed/Chemical Looping" test rig enables the analysis of the bed materials under more realistic process conditions (e.g. CO₂-sorption and attrition behaviour). For the test preparation and post-processing, the change in particle size distribution is determined by laser diffraction as a measure of the mechanical stability.

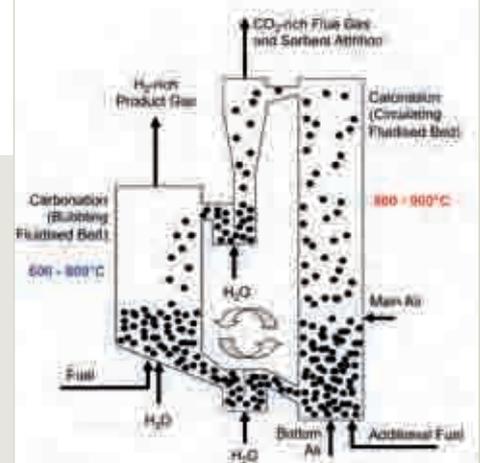
Thermogravimetry is used for the determination of the CO₂ sorption capacity in terms of the cycle stability and the reaction kinetics. For this purpose a new magnetic suspension balance is employed which in addition also makes it possible to investigate biomass gasification as well as catalytic reactions (up to 1200 °C, 40 atm). In order to gasify mineral rich biomass (e.g. straw) with AER technology the ash melting behaviour has to be considered. Therefore, the tendency of agglomeration of different bed material mixtures (ash, CO₂-sorbents, additives) is analysed with a rotational viscosimeter in a temperature range up to 1300 °C.

// Contact

Dipl.-Ing. Jochen Brellocks

E-Mail: jochen.brellocks@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-211



// Brennstoff-Reformierung und -Synthese

Fuel Reformation and Synthesis

// REG-Expertise: Brennstoff-Reformierung und -Synthese

Im Fachgebiet REG werden innovative Technologien zur Herstellung von wasserstoffreichen Gasen und chemischen Energieträgern, insbesondere Wasserstoff und Methan, untersucht und anwendungsorientiert weiterentwickelt. Wichtige Aufgabengebiete dabei sind die Brennstoff-Reformierung sowie die Synthese und Konditionierung von Erdgassubstitut (SNG, Substitute Natural Gas).

Die Aktivitäten zur Brennstoff-Reformierung werden seit Fertigstellung des Modulare Testsystems im Jahr 2008 stetig ausgeweitet. In mehreren Förder- und Industrieprojekten wurde die Erzeugung wasserstoffreicher Reformatgase beispielsweise aus Erdgas, Flüssiggas, Ethanol, Dimethylether (DME) oder Glycerin experimentell untersucht und weiterentwickelt. Neben der Gas-erzeugung mittels Wasserdampf-Reformierung steht dabei auch der Systemaspekt im Vordergrund, d. h. die Prozesssteuerung und das Wechselspiel mit Peripherie-Komponenten oder ggf. notwendige Gasreinigungsschritte. Zu den Anwendungen zählen insbesondere PEM-Brennstoffzellensysteme zur Hausenergieversorgung und zur dezentralen, netzunabhängigen Stromversorgung (Leistungsbereich ca. 1–10 kW_{el}). Das Modulare Testsystem bietet die Möglichkeit, einzelne Komponenten (Reformer, Stack, Peripherie- Komponenten etc.) oder Teilmodule hinsichtlich unterschiedlicher Forschungs- und Entwicklungsziele einfach und realitätsnah im Gesamtsystemverbund zu untersuchen.

Im Fokus der Untersuchungen zur Gewinnung von chemischen Energieträgern aus erneuerbaren Energien steht die Methansynthese. Neben der Konversion von Synthesegasen aus der Vergasung von Biomasse wird die SNG-Erzeugung aus Wasserstoff und Kohlendioxid bearbeitet. Die Entwicklungstätigkeit des ZSW umfasst dabei die Konzeption, Konstruktion, Charakterisierung und Optimierung von Reaktoren sowie die Prozessführung. Weiterhin werden Gesamtprozessketten z. B. zur Speicherung von regenerativ erzeugtem Strom durch das „Power-to-Gas“-Verfahren mittels Modellierung und Simulation mit der Software IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment) abgebildet und verbessert.

// REG expertise: Fuel reformation and synthesis

In the REG department, innovative technologies for manufacturing hydrogen-rich gases and chemical fuels, in particular hydrogen and methane, are investigated and further developed with a view to using them in applications. Important task areas include fuel reforming as well as synthesising and conditioning substitute natural gas (SNG).

The activities for reforming fuels have been continually expanded since the completion of the modular test system in 2008. In several grant- and industrial-supported projects, the production of hydrogen-rich reformat gases from, for example, natural gas, liquid gas, ethanol, dimethyl ether (DME) or glycerine have been investigated experimentally and further developed.

The focus of investigations into producing chemical fuels from renewable energies is on methane synthesis. In addition to converting synthesis gases derived from the gasification of biomass, work is being conducted on generating SNG from hydrogen and carbon dioxide. In this respect, ZSW's development work includes conceiving, constructing, characterising and optimising reactors as well as the process management.

// Methanisierungsanlage zur Erzeugung von Erdgassubstitut (SNG) im Technikumsmaßstab.
// Methanisation system for generating substitute natural gas (SNG) at a technical laboratory scale.

// Contact

Dr. Marc-Simon Löffler

E-Mail: marc-simon.loeffler@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-233





// Power-to-Gas

// REG-Expertise: Power-to-Gas

Ziel eines zukünftigen Energiesystems ist eine nachhaltige Vollversorgung aus erneuerbaren Ressourcen. Viele erneuerbare Energien wie die Windkraft oder Photovoltaik fallen jedoch stark fluktuierend an. Trotzdem sollen die Endenergien Strom, Wärme und Kraftstoff auch weiterhin jederzeit ohne Nutzungsbeschränkungen zur Verfügung stehen, woraus sich die Notwendigkeit zur Energiespeicherung ergibt. Für eine zukünftige Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien ist eine Speicherkapazität im Stromnetz von 20 bis 40 TWh erforderlich. Während die derzeit vorhandene Speicherkapazität von ca. 0,04 TWh hauptsächlich von Pumpspeicherkraftwerken bereitgestellt wird, können die zukünftig benötigten Speicherkapazitäten bevorzugt durch die Erzeugung von Methan bereitgestellt werden, das sich im vorhandenen Erdgasnetz mit einer Untertage-Speicherkapazität von über 200 TWh speichern lässt.

Das am ZSW zusammen mit Partnern entwickelte Power-to-Gas-Konzept sieht vor, „überschüssigen“ Strom mittels Elektrolyse zunächst zu Wasserstoff und in einer anschließenden Synthesestufe mit CO₂ zu Methan umzusetzen (Methanisierung). Als CO₂-Quelle kommt z. B. CO₂ aus Biogasanlagen, aus der Bioethanolherstellung, aus Kraftwerksprozessen und aus der chemischen Industrie infrage.

Im Fachgebiet REG erfolgt das Basic Engineering für Power-to-Gas-Anlagen auf der Basis des spezifischen Anforderungsprofils. Ausgangspunkt ist die Erstellung von Lastenheften. Der Prototypenbau von Power-to-Gas-Anlagen wird im Fachgebiet bis zu einer Leistungsklasse von 250 kW_{el} realisiert. Die am ZSW aufgebauten, containerintegrierten Anlagen ermöglichen den Betrieb mit verschiedenen CO₂-Quellen unter spezifischen Einsatzbedingungen wie der Nutzung von Off-Gas bei Biogaseinspeiseanlagen. Ziel ist der Anlagenbetrieb mit realer Netzeinbindung und die Prozessoptimierung.

// Power-to-Gas-Konzept zur bidirektionalen Kopplung von Strom- und Gasnetz mit Anbindung an den Verbrauchssektor Mobilität.
 // Power-to-Gas concept for bi-directionally coupling electricity and gas networks with connections to the mobility consumption sector.

// Contact

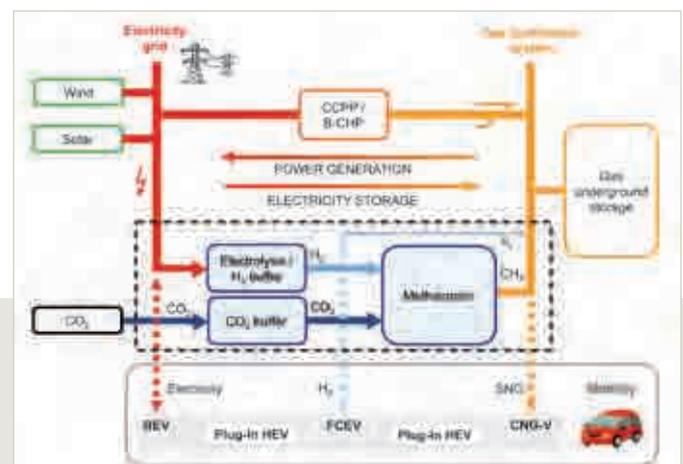
Dr. Ulrich Zuberbühler
 E-Mail: ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de
 Phone: +49 (0) 711 78 70-239

// REG expertise: Power-to-Gas

The goal of future energy systems is a sustainable complete supply based on renewable resources. However, many renewable energies such as wind power and photovoltaics are by nature strongly fluctuating. Despite this, it is essential that the final energy products electricity, heat and fuel continue to be fully available at all times and without restrictions in use, which therefore requires the use of energy storage systems. A future electricity supply based on renewable energies requires a storage capacity in the electricity grid of between 20 and 40 TWh. Whereas the currently existing storage capacity of around 0.04 TWh is mainly provided by pumped storage power plants, the storage capacity required in future can be preferably provided by generating methane, which can be stored in the existing natural gas network with an underground storage capacity of > 200 TWh.

The Power-to-Gas concept developed by ZSW in collaboration with partners aims to convert “surplus” electricity into hydrogen by means of electrolysis and, in a subsequent synthesis stage with CO₂, into methane (methanation). Possible CO₂ sources include CO₂ from biogas plants, bioethanol production, power plant processes and the chemical industry.

The REG department carries out the basic engineering for Power-to-Gas plants based on specific requirement profiles. The starting point is the drawing up of specifications. The department constructs and operates prototype Power-to-Gas plants up to an output class of 250 kW_{el}.



CCPP	Combined Cycle Power Plant	CNG-V	Compressed Natural Gas Vehicle
B-CHP	Block-type combined heat and power station	Plug-In HEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle (especially: Plug-In Electric Drive Motor Vehicles/Range-Extended Electric Vehicle)
EV	Electric Vehicle		
BEV	Battery Electric Vehicle		
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle		

// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Hauptaufgabe des Fachgebietes ist die Untersuchung und Weiterentwicklung von Energiespeichersystemen. Dabei steht deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung und in Unfallsituationen im Mittelpunkt. Andere Arbeiten sind die Bestimmungsmöglichkeiten des Systemzustandes (Ladezustand, Alterung), die Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit sowie die thermische und die elektrische Modellierung und Simulation von Batterien und Batteriekomponenten.

Die Aktivitäten des Fachgebietes lassen sich in folgende Arbeitsschwerpunkte unterteilen:

- > Batterietests
- > Sicherheitstests von Batterien
- > Batteriesystemtechnik
- > Thermische und elektrische Batteriemodellierung und Simulation
- > Weiterbildung

Für die Bereiche Batteriecharakterisierung, Sicherheitstests und thermische Untersuchungen wird die gesamte Testkapazität mit dem Neubau des ZSW-Labors für Batterietechnologie (eLaB) bis 2011 mehr als verdoppelt. Das Fachgebiet Akkumulatoren beschäftigt Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker aus den Fachrichtungen Elektrochemie, Physik und Elektrotechnik/Elektronik.

// Our Main Focus

The main task of the research department is to investigate and further develop energy storage systems, whereby the work focuses on their characterisation under various operating conditions as well as studying the behaviour during incorrect operation and in accident situations. Other work includes methods for determining the system condition (state of charge ageing), predicting the system capability and, in addition, the thermal and electrical modelling and simulation of batteries and battery components.

The activities of the research department can be divided into the following specialist areas:

- > battery tests
- > battery safety tests
- > battery system technology
- > thermal and electrical battery modelling and simulation
- > further training

For the battery characterisation, safety tests and thermal investigations, the entire test capacity is being more than doubled by 2011 in ZSW's newly constructed Laboratory for Battery Technology (eLaB). The Accumulators research department employs scientists, engineers and technicians from the electrochemistry, physics and electrical engineering/electronics fields.



// Contact

Dr. Harry Döring

E-Mail: harry.doering@zsw-bw.de

Phone: +49 (0)731 95 30-602

// Speichersysteme

Storage Systems

// Hybridisierung von Lithiumbatterien in stationären Anwendungen mit fluktuierendem Betrieb (HYLIS)

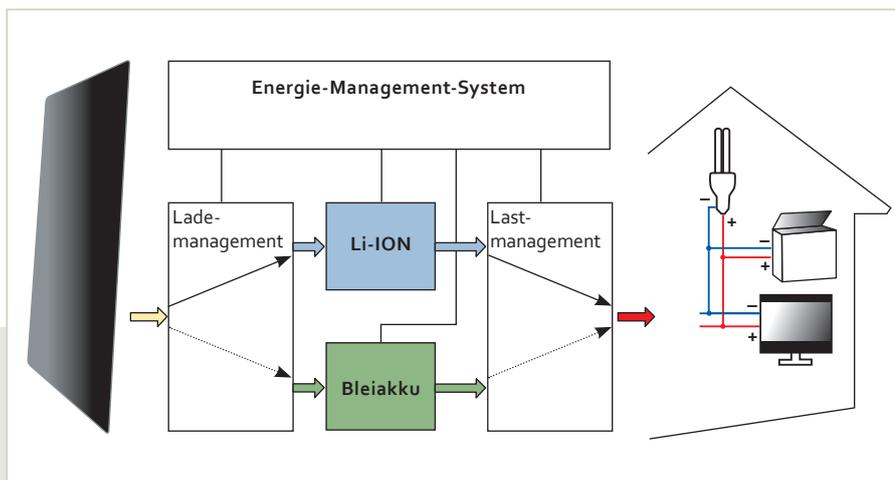
Im Rahmen des Förderprojekts HYLIS werden Batterie-Hybrid-Systeme bestehend aus Blei- und Lithium-Ionen-Batterien in stationäre Inselsysteme integriert. Mit der Hybridisierung können so die Vorteile beider Speichertechnologien miteinander kombiniert und deren Nachteile minimiert werden. Insbesondere die Lithium-Ionen-Batterien werden systematisch auf Alterungseffekte in verschiedenen Betriebsszenarien untersucht. Neben der zyklischen wird auch die kalendarische Alterung in die Untersuchung miteinbezogen. Durch hochdynamische Vermessungen erfolgte eine Parametrisierung des Batteriemodells.

Die gewonnenen Daten werden dazu verwendet, ein Batteriemodell zu erstellen, das zusätzlich die Alterung der Batterie mitberücksichtigt. Durch die Mitführung der Alterung in Form kontinuierlich angepasster Parametersätze kann das Batterieverhalten simuliert und im Ergebnis die Betriebsstrategie optimiert werden. Daraus ergibt sich die vorteilhafte Auslegung eines Batteriehybridspeichers für die stationäre Anwendung. Somit übernimmt die Lithium-Batterie den Großteil der zyklischen Belastung (hoher Energie-durchsatz), während der Bleibatteriespeicher hauptsächlich die Funktion des Langzeit-Reservespeichers hat. Dadurch lassen sich eine lange Betriebszeit und damit geringere Kosten realisieren.

// Hybridisation of lithium batteries in stationary applications with fluctuating operation (HYLIS)

As part of the HYLIS support project, hybrid battery systems consisting of lead-acid and lithium-ion batteries are being integrated within stationary stand-alone systems. The hybridisation enables the benefits of both storage technologies to be combined together and their disadvantages to be minimised. In particular, the lithium-ion batteries were systematically investigated in terms of ageing effects in various operating scenarios. In addition to cycle life, the calendar life ageing was also included in the investigation. Highly dynamic measurements were conducted to parameterise the battery model.

The data gained was used to create a battery model that also takes into account the ageing of the batteries. Incorporating the ageing by continually adjusting the parameter sets makes it possible to simulate the battery behaviour and, as a result, to optimise the operational strategy. This has been beneficial in providing a hybrid battery storage system for stationary use. Here the Li-battery is largely responsible for the cyclical loading (high energy throughput), whereas the lead-acid battery mainly acts as a long-term reserve storage system. This enables a longer operating time and thus reduced costs.



// Energie- und Informationsfluss des Batterie-Hybrid-Systems.
// Energy and information flow for the battery hybrid system.

// Contact

Volker Späth

E-Mail: volker.spaeth@zsw-bw.de

Phone: +49 (0)731 95 30-823

// Zukünftige Energieversorgungsstrukturen (NET-ELAN)

Future Energy Supply Structures (NET-ELAN)

// Netzintegration von elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen (NET-ELAN)

Durch Fahrzeuge mit elektrifizierten Antriebssystemen mit entsprechender Speichertechnik besteht die Chance, den Einsatz fossiler Kraftstoffe und die Importabhängigkeit im Verkehrsbe- reich zu verringern. Der effiziente Einsatz elektrischer Energie aus CO₂-armen oder -freien Primärenergiequellen führt zu einer Reduktion der verkehrsbedingten lokalen Emissionen wie Lärm, CO₂ oder Stickoxiden. Durch die Integration der Batterie eines Elektrofahrzeugs in das Stromnetz besteht die Möglichkeit, das fluktuierende Leistungsangebot einiger erneuerbarer Energien auszugleichen und damit zur kurzfristigen Stabilisierung der Netze beizutragen.

Das Vorhaben soll die Frage beantworten, ob und wie der Bestand an batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen als Energiespeicher im elektrischen Netz sinnvoll eingesetzt werden kann. Weiter wird analysiert, ob ein verbraucherseitiges Lastmanagement zur Kapazitätseinsparung im Kraftwerkspark und zur energieeffizienten Einbindung von fluktuierenden Stromerzeugern beitragen kann. Es werden Aussagen getroffen zur technischen Machbarkeit sowie zu möglichen Hemmnissen. Neben der Analyse verbraucherseitiger sowie emissionsseitiger Auswirkungen werden auch mögliche Kosten- und Betreibermodelle erarbeitet.

Eine der Haupttätigkeiten des ZSW innerhalb dieses Forschungsprojektes ist die Simulation eines Lithium-Ionen-Akkumulators für mobile Anwendungen. Die modelltechnische Beschreibung umfasst ein hochgenaues Abbild der Batterie, welches neben der Leistungsberechnung auch die Alterung der Batterie erfasst. Ebenfalls wird der Zusammenhang zwischen Alterung und Wertverlust untersucht, um den Performanceverlust monetär beziffern zu können. Durch diese Kombinationen ist es möglich, unterschiedliche Betriebsführungsstrategien hinsichtlich des Lebensdauer- und auch des Kostenoptimums zu untersuchen.

// Grid integration of electric drive systems in existing and future energy supply structures (NET-ELAN)

The use of vehicles with electrical drive systems with corresponding storage technology offers an opportunity to reduce both the fossil fuel use and import dependence in the transport sector. The efficient use of electrical energy from low-CO₂ or CO₂-free primary energy sources reduces the local emissions caused by transport such as noise, CO₂ and nitrogen oxides. Integrating the batteries from electric vehicles into the power grid also offers a possibility for balancing out the fluctuating capacity provided by some renewable energies, thus helping to stabilise the grid in the short term.

The project seeks to determine whether and how the stock of battery electric vehicles can be deployed sensibly as energy storage systems in the grid. It is also being analysed whether consumer-based load management can lead to capacity savings in the generation mix and contribute to the energy-efficient incorporation of fluctuating electricity generators. Conclusions will be drawn on the technical feasibility and possible hurdles. In addition to analysing consumer- and emission-based effects, possible cost and operating models are also being developed.

One of ZSW's main activities within this research project is to simulate a lithium-ion accumulator for mobile applications. The model-based depiction encompasses a highly precise simulation of the battery, which in addition to the capacity calculations also includes the ageing of the battery. The relation between ageing and devaluation is also being investigated in order to be able to estimate the performance loss in monetary terms. These combinations enable different operational strategies to be investigated in terms of service life and cost optimisation.



// Contact

Dr.-Ing. Michael Danzer

E-Mail: michael.danzer@zsw-bw.de

Phone: +49 (0)731 95 30-602

// Charakterisierung von Speichersystemen

Characterisation of Storage Systems

// Charakterisierung von Speichersystemen

Für Traktionsbatterien, aber auch für stationäre photovoltaische Systeme entwickelt sich aktuell ein starker Trend zu Lithium-Ionen-Batterien. Stehen für den Fahrzeugantrieb große spezifische Leistungen im Mittelpunkt, so treten bei Photovoltaiksystemen in der Regel Leistungen auf, die etwa um den Faktor 100 kleiner sind. Neben den Untersuchungen zur Kapazität und zum Innenwiderstand bei unterschiedlichen Bedingungen werden Wirkungsgradmessungen und Messungen zur Ruhespannungscharakteristik durchgeführt. Mit Hilfe systematischer Alterungstests bei verschiedenen Betriebsparametern können Aussagen über die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlichen Elektrodenmaterialien getroffen werden. Ein Schlüsselparameter für die Alterung ist die Batterietemperatur und die Temperaturverteilung. Deshalb werden intensive Untersuchungen zur Entstehung und Verteilung von Verlustwärme sowie deren Abtransport durchgeführt. Diese Prozesse werden über geeignete Modelle modelliert und simuliert.

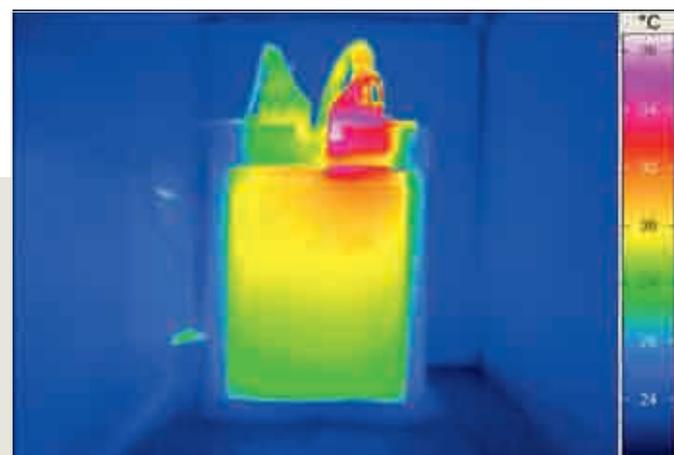
Um das mögliche Gefahrenpotenzial abzuschätzen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen, ist neben der Bestimmung elektrischer Parameter auch das Verhalten der Batterie in Extremsituationen von größter Bedeutung. Wachsende Bedeutung gewinnen diese Untersuchungen insbesondere für die Realisierung des elektrifizierten Antriebs, da hier Speicher mit einem deutlich größeren Energieinhalt (10–50 kWh) zum Einsatz kommen werden. Aus diesem Grund werden am ZSW Sicherheitstests nach entsprechenden Vorschriften und Standards oder unter spezifischen, mit dem Partner abgestimmten Testbedingungen durchgeführt. Die Ausföhrung der Tests dient sowohl der Qualifizierung eines fertigen Produktes als auch der frühzeitigen Auf-

deckung von Schwachstellen während der Entwicklungsphase. Dafür wird am ZSW ein geeigneter Testbunker betrieben, der über eine Feuerlöschanlage, eine Gaswäsche, Videobeobachtung sowie die Datenaufzeichnung der elektrischen, mechanischen und thermischen Größen verfügt.

// Characterisation of storage systems

For both traction batteries and stationary photovoltaic systems, a trend is currently developing towards lithium-ion batteries. Whereas for vehicle engines the focus is on large specific power, with photovoltaic systems the specific power is generally around 100 times smaller. In addition to investigating the capacity and internal resistance with different conditions, measurements on efficiency and on the open circuit voltage characteristics are also conducted. Systematic ageing tests with a diverse range of operating parameters provide information on the service life characteristics of lithium-ion batteries with different electrode materials. A key parameter for the ageing is the battery temperature and the temperature distribution. For this reason, intensive studies are made on the creation and distribution of heat losses and their conduction. These processes are modelled and simulated.

In order to estimate the possible potential risks and to take counter measures, it is not just extremely important to determine the electrical parameters but also the behaviour of batteries in extreme situations. In particular, these investigations are also becoming increasingly important for realising the electric drives, since here storage units with a considerably larger energy content (10–50 kWh) will be used. For this reason, safety tests are conducted at ZSW in accordance with the corresponding regulations and standards or under specific test conditions agreed upon with the respective partner. The tests are conducted not just to certify a finished product but also to uncover any weak points at an early stage during the development phase. For this purpose ZSW operates a suitable test bunker that has a fire extinguishing system, gas scrubber and video monitoring, and which also records electrical, mechanical and thermal parameters.



// Temperaturverteilung an einer Li-Zelle bei Hochstrombelastung.
// Temperature distribution of a Li cell with high electrical loads.

// Contact

Robert Kuhn

E-Mail: robert.kuhn@zsw-bw.de

Phone: +49 (0)731 95 30-822

// Akkumulatoren Materialforschung (ECM)

Accumulators Materials Research (ECM)

// Unsere Kernkompetenzen

Der traditionelle Schwerpunkt der Arbeiten von ECM liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren. Kernkompetenz für die Entwicklung maßgeschneiderter Pulver ist ein tiefes Verständnis über Zusammenhänge zwischen Struktur und Pulvermorphologie einerseits und den gewünschten Funktions- und Verarbeitungseigenschaften andererseits.

2010 wurde mit der Inbetriebnahme einer Pilot-Fertigungslinie für die Herstellung von Flach- sowie Rundzellen ein großer Schritt in ein neues Kompetenzfeld erfolgreich umgesetzt, der es erlaubt, angepasste vorindustrielle Prozessentwicklungen für neuartige Komponenten und damit leistungsfähigere zukünftige Zellgenerationen zu generieren.

Neben den klassischen Schichtoxiden für die Kathoden und kohlenstoffbasierten Anoden befasst sich das ZSW intensiv mit allen Arten von Olivinen, Titanaten, Legierungsanoden, neuen Elektrolytsystemen und speziellen Additiven. Für Schadensanalysen, aber auch für die Bewertung neuer Zellen sind wir auf Post-mortem-Analysen spezialisiert. Dieses Know-how ist essenziell für das Verständnis von Alterungsprozessen, potenziellen Systemschwachstellen und für die Materialoptimierung. Um einen schnellen Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung praxisrelevanter Energiespeichersysteme zu gewährleisten, forscht das Fachgebiet in einem internationalen, hochmotivierten Team von 40 Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern aus Chemie, Physik und Materialwissenschaften.

// Our Main Focus

ECM's work traditionally focuses on synthesising and characterising function materials for batteries and super condensers. As a core area of expertise, the development of tailor-made powder requires a profound understanding of the interrelationship between the structure and powder morphology on the one hand and the desired function and processing properties on the other.

With the launch of a pilot production line in 2010 for manufacturing flat and cylindrical cells, we have made a major step towards successfully implementing a new field of expertise that enables us to adapt pre-industrial process developments for new components and thus generate more powerful future cell generations.

In addition to traditional layered oxides for the cathodes and carbon-based anodes, we are also closely investigating all types of olivines, titanates, alloy anodes, new electrolyte systems and special additives. We specialise in postmortem analyses not just for damage analyses but also for assessing new cells. This expertise is essential for understanding ageing processes, potential system weak points and for optimising the material. Our international and highly motivated team of 40 scientists, engineers and technicians from the chemistry, physics and material sciences fields are conducting research to ensure a rapid transfer of the research results into the development of new, practice-oriented energy storage systems.



// Contact

Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens

E-Mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-612

// Prozesstechnologie Lithium-Ionen-Zellen

Process Technology for Lithium-Ion Cells

// Prozesstechnologie Lithium-Ionen-Zellen

Obwohl seit vielen Jahren intensiv im Laborbereich an Lithium-Ionen-Zellen geforscht wird, gibt es bisher nur wenig Wissen über das Zusammenwirken verschiedener Materialien und Prozessparameter in realen Zellen. Das ZSW hat diese Lücke nun geschlossen, indem es eine Pilot-Fertigungslinie aufgebaut hat, mit der Muster von Lithium-Ionen-Zellen in verschiedenen Bauformen hergestellt werden können. Mit dieser Linie sind umfangreiche Entwicklungsarbeiten möglich, angefangen bei der Materialverarbeitung bis hin zur Untersuchung der Ausfallmechanismen von fertigen Zellen.

Mit unterschiedlichen Mixern können Elektrodenslurries bis 15 Liter präpariert werden. Eine Beschichtungsanlage und ein Kalandrier wurden für die Verarbeitung der Slurries zu Batterie-Elektroden eingesetzt. Eine weitere Beschichtungsanlage wird ab 2011 zusätzlich zur Verfügung stehen. Bei der anschließenden Assemblierung können die Elektroden sowohl zu Flachzellen als auch zu Rundzellen verbaut werden. Mehrere Anlagenkonzepte stehen hierfür zur Verfügung.

Zahlreiche Entwicklungsthemen werden in diesem Technikum bearbeitet. Dazu gehören Elektrodenrezepturen, Mischprozess, Trocknungsprozess, Verdichtungsprozess, Elektrodenbalancierung, Materialeinflüsse und -wechselwirkungen, Elektrolytdosierprozess und mechanische Verarbeitungsparameter. Zu den Erfolgen zählen die Entwicklung eines Rundzellentyps 18650, der eine Stabilität von über 3000 Zyklen erreicht hat, sowie einer zehnlagigen Pouch-Zelle.

// Process technology used in lithium-ion cells

Although intensive research has been carried out on lithium-ion cells for many years at the laboratory level, there is still little known about the interaction of various materials and process parameters in real cells. ZSW has now closed this gap by developing a pilot production line that can produce samples of lithium-ion cells in various designs. This line enables extensive development work, ranging from the material processing to investigating the failure mechanisms in a real cell.

Up to 15 litres of electrode slurries can be prepared using different mixers. A coating system and calender were used for processing the slurry to coat battery electrodes. A further coating system will be available from 2011. The electrodes can then be assembled to form flat or cylindrical cell designs. Several system concepts are available for this purpose.

Numerous development topics are researched in this technical lab. These include electrode compositions, mixing processes, drying processes, compression processes, electrode balancing, material influences and interactions, electrolyte dosing processes and mechanical processing parameters. The successes include the development of a cylindrical cell type 18650, which has achieved a stability of more than 3000 cycles, and a ten-layered pouch cell.

// Contact

Dr. Alice Hoffmann

E-Mail: alice.hoffmann@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-213

// 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.

”



// In-situ-Analytik

In Situ Analytical Methods

// In-situ-Analytik – ein Blick in die Zelle

Die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Energiespeichersystemen ist durch die einzelnen Komponenten und deren komplexe Wechselwirkungen bestimmt. Für eine eingehende Charakterisierung bieten sich elektrochemische In-situ-Messmethoden an, bei denen analytische Untersuchungen direkt während des Ladens und Entladens durchgeführt werden. In-situ-Methoden arbeiten zerstörungsfrei und liefern in kurzer Zeit viel Information bei vergleichsweise geringem Aufwand für die Probenpräparation.

2010 wurde damit begonnen, verschiedene neue Methoden am ZSW aufzubauen:

- > Die In-situ-Dilatometrie ermöglicht die Verfolgung von Dickenänderungen von Elektroden während des Ladens und Entladens. Dies liefert wertvolle Anhaltspunkte zum Reaktionsmechanismus und erlaubt eine Abschätzung der mechanischen Belastungen, die im Elektroden/Separator-Verbund auftreten.
- > Die In-situ-Raman-Spektroskopie liefert Informationen zu strukturellen Änderungen und erlaubt damit Rückschlüsse auf den Reaktionsmechanismus, aber auch auf die Alterung der Komponenten während des Betriebes.
- > Die In-situ-IR-Spektroskopie eignet sich hervorragend zur Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen Elektrode und Elektrolyt und zur Untersuchung von Deckschichten auf den Elektroden, die sich während des Ladens und Entladens ausbilden können.

Diese neuen In-situ-Methoden sind eine ideale Ergänzung zur bereits am ZSW etablierten Ex-situ- und Post-mortem-Analytik.

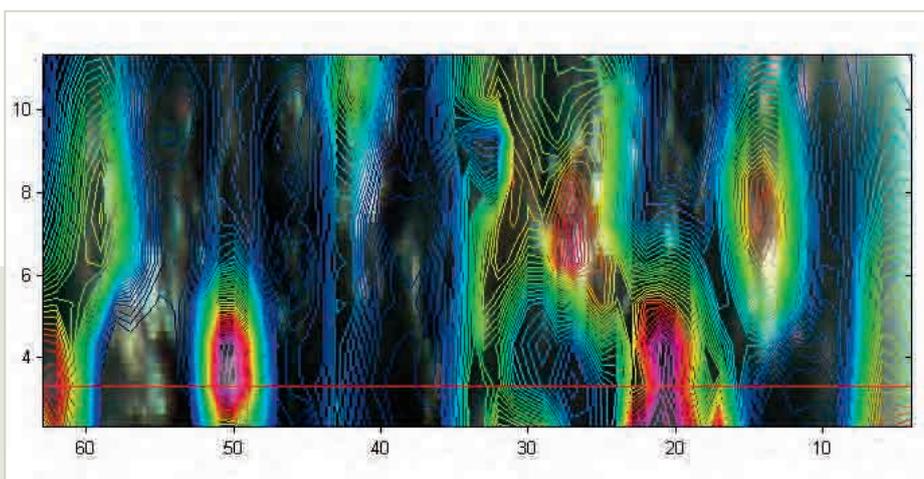
// In Situ analysis – a glimpse inside the cell

The performance and service life of energy storage systems are determined by their individual components and complex interactions. Electrochemical in situ measurement methods are suitable for their detailed characterisation, in which analytical investigations are conducted during charging and discharging. In situ methods work in a non-destructive manner and deliver considerable information within a short period of time, with a comparatively low amount of effort required for the sample preparation.

In 2010, ZSW began to develop various new methods:

- > In situ dilatometry enables changes to the electrode thickness to be monitored during charging and discharging. That provides valuable information on the reaction mechanism and makes it possible to estimate the mechanical stress that occurs in the electrode/separator assembly.
- > In situ Raman spectroscopy provides information on structural changes and thus enables conclusions to be drawn not just on the reaction mechanism but also on the ageing of the components during the operation.
- > In situ IR spectroscopy is ideal for determining the interactions between the electrodes and electrolyte and for investigating surface layers on the electrodes that can form during the charging and discharging.

These new in situ methods ideally supplement the ex-situ and postmortem analysis that is already established at ZSW.



// Contact

Dr. Mario Wachtler

E-Mail: mario.wachtler@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-403

// Dimensionen in μm , konfokale Raman-Mikroskopie, Anregungswellenlänge 532 nm, 100-fache Vergrößerung.
// Dimensions in μm , confocal Raman microscopy, excitation wave length 532 nm, 100-fold magnification.

// Nanomaterialien für die Energiespeicherung

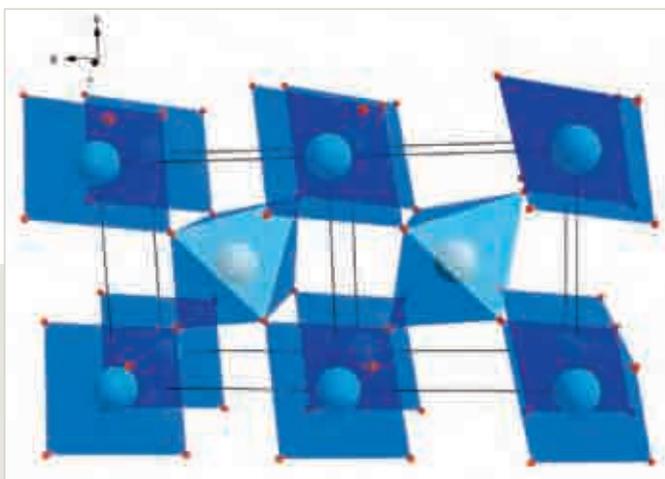
Nanomaterials for Energy Storage

// Charakterisierung von Speichersystemen

Nanotechnologie wird als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts gesehen. In der Energiespeicherung hat sie bereits in vielen Bereichen Einzug gehalten. Sichere Lithium-Ionen-Zellen auf Basis von Lithiumeisenphosphat wären ohne Nanotechnologie nicht möglich.

Am ZSW gelang es in Kooperation mit der Universität Ulm, ein Nano-Titanoxid (TiO_2) vom Rutil-Typ für die Energiespeicherung verwendbar zu machen. Rutil – eigentlich elektrochemisch wenig aktiv – zeigt in dieser Form ausgezeichnete Speicherfähigkeit und Zyklenstabilität und hält sehr hohen Strombelastungen stand.

Aktuell werden Untersuchungen durchgeführt, mit denen wir den Mechanismus des Speichervorgangs verstehen wollen, um die Erkenntnisse auf ganz neue Materialklassen zu übertragen. Dieses Material kann den Graphit auf der Anode als Aktivmaterial ersetzen und zeichnet sich durch sehr gute Sicherheitseigenschaften aus. Auf der Kathodenseite arbeitet das Fachgebiet an Nano-Phospho-Olivinen. Hier konnten substituierte Lithiummanganphosphate mit sehr guten elektrochemischen Eigenschaften hergestellt werden. Erstmals gelang es, den typischen Arbeitsbereich des Mangans zu erweitern und die zweite Redoxstufe zu aktivieren. Herstellbarkeit und Verarbeitbarkeit in Folgeprozessen stellen bei Nanomaterialien eine wesentliche Herausforderung dar. Unser Konzept ist es, die elektrochemisch aktiven Nanokristallite in mikroskopisch größere Einheiten (Sekundärpartikel) einzubinden.



// TiO_2 (Rutil-Typ).
// Rutil-type TiO_2 .

// Characterisation of storage systems

Nanotechnology is considered as a key technology of the 21st century. It has already become established in many areas involved with energy storage. Safe lithium-ion cells based on lithium iron phosphate would not be possible without nanotechnology.

In cooperation with Ulm University, ZSW has succeeded in making rutile-type nano titanium oxide suitable for energy storage purposes. In this form rutile – which in principle is rather electrochemically inactive – shows excellent storage characteristics and cycle stability and allows high current rates.

We are currently carrying out investigations to understand the mechanism behind this storage process to enable us to transfer the knowledge to new material classes. This material can replace graphite on the anode as storage material and features very good safety properties. On the cathode side we are working on nano phosphor olivines. Here we have been able to synthesise substituted lithium manganese phosphates with excellent electrochemical properties. For the first time it has been possible to expand the typical working range of manganese and to activate the second redox stage. A substantial challenge with nanomaterials is posed by their producibility and processability. Our concept is to incorporate the electrochemically active nanocrystallites into microscopically larger units (secondary particles).

// Contact

Dr. Peter Axmann

E-Mail: peter.axmann@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-404

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

// Unsere Kernkompetenzen

Komponenten und Materialien für die nächste Generation von Brennstoffzellen

Der Einsatz von Alkoholen als Brennstoff in Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellensystemen (PEMFC) ist aus Gründen der Brennstofflogistik als auch der Energiedichte attraktiv. Durch die komplexen elektrochemischen Vorgänge an der Alkoholelektrode sind die Leistungsdichten alkoholbetriebener Zellen dabei geringer als bei wasserstoffbetriebenen Zellen. Durch ein vertieftes Verständnis der elektrochemischen Prozesse der PEMFC können neue Ansätze zur Steigerung der Aktivität der elektrochemischen Oxidation von Alkoholen erforscht werden, oder Möglichkeiten zur Minimierung oder Vermeidung von Edelmetallkatalysatoren untersucht werden. Im Fokus der experimentellen Arbeiten stehen Untersuchungen an neuen Funktionsmaterialien (Membranen, Elektrokatalysatoren etc.), die Entwicklung neuer Konzepte für Aktivkomponenten (Elektroden, Membran-Elektroden-Anordnungen etc.) sowie die Bestimmung der Beständigkeit struktureller Komponenten (Dichtungen, Bipolarplatten).

Technologien für neue Energiespeicherkonzepte

Die effiziente Speicherung von elektrischer Energie wird zur zentralen Herausforderung der sicheren Energieversorgung in den kommenden Jahren. Dabei rücken neue Themen wie beispielsweise die Redox-Flow-Zelle oder Metall-Luftzellen in den Fokus der Forschungsanstrengungen. Auch gewinnt die Erzeugung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff über Elektrolyse zunehmend an Bedeutung. Für all diese Themen spielen neue Aktivmaterialien und neue Zellkonzepte eine zentrale Rolle. Unser Team hat langjährige Erfahrungen auf diesem Gebiet und verfügt über die Infrastruktur

und Möglichkeit, neue technologische Ansätze schnell im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren.

Components and 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 focuses on investigating new function materials (membranes, electrocatalysts, etc), developing new concepts for active components (electrodes, membrane-electrode arrangements, etc.) as well as determining the durability of structural components (sealing, 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 means of electrolysis will become increasingly important. New active materials and new cell concepts will play a central role with all these topics, whereby 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.



// Contact

Dr. Ludwig Jörissen

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

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

// Direkt-Alkohol-Brennstoffzellen

Direct Alcohol Fuel Cells

// Direkt-Alkohol-Brennstoffzellen mit Anionenauschermembran

Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) werden üblicherweise mit stark sauren, perfluorierten Sulfonsäuremembranen hergestellt, was den Einsatz teurer, platinhaltiger Katalysatoren auf der Anode und der Kathode erfordert. Eine Reduktion des Platingehalts ist durch den Übergang von sauren zu basischen Elektrolyten möglich. In jüngster Zeit wurden dafür stark basische Ionenaustauschermembranen entwickelt, die in stark alkalischen Lösungen stabil sind.

Im Vorhaben wurden verschiedene platinfreie und Pt-Schwarz-Katalysatoren auf einer stark basischen Anionenaustauschermembran als Dünnschichtelektroden sowie in Form konventioneller Gasdiffusionselektroden verglichen. Die Polarisationskurven mit platinfreien Elektroden verliefen alle bei höheren Potenzialen als die zum Vergleich in Dünnschichttechnik hergestellte Pt-haltige Elektrode. Elektroden mit Silberkatalysatoren weisen die höchsten offenen Zellpotenziale auf. Die konventionelle Gasdiffusionselektrode (Raney-Ag) zeigt unter Strombelastung bei niedrigen Stromdichten die höchsten Potenziale.

Ab Stromdichten von ca. 150 mA/cm² ist kein stabiler Betrieb mehr möglich. Die Dünnschichtelektrode mit Fe/Co-Katalysator erlaubte den Betrieb bei bis zu 400 mA/cm². Es konnte gezeigt werden, dass mit stark basischen Anionenaustauschermembranen im basischen Medium mit platinfreien Katalysatoren hohe Stromdichten bei hohen Potenzialen erzielt werden können. Die eingesetzten Dünnschichtelektroden zeigten eine gute Strombelastbarkeit, erfordern im Bereich niedriger Stromdichten jedoch noch weitere Optimierung.

// Stromdichte-Potenzialkurven von Halbzellen mit stark basischen Anionenaustauschermembranen bei Verwendung platinfreier Katalysatoren.

// Current density-potential curves for half cells with strongly basic anion exchange membranes when using platinum-free catalysts.

”

// Dr. Ludwig Jörissen

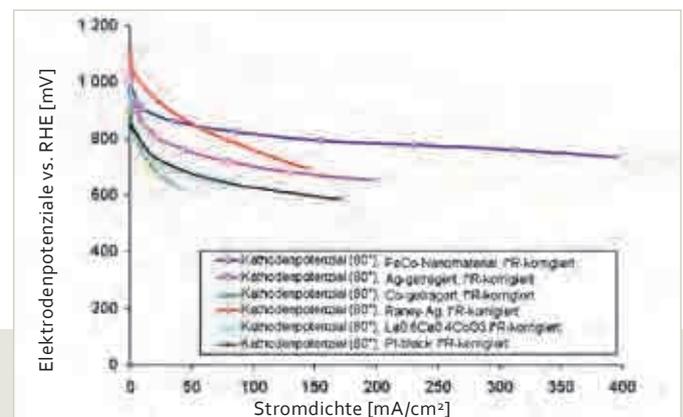
Im Mittelpunkt unserer Arbeiten stehen neue Materialien und Komponenten für Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Redox-Flow-Batterien und Metall-Luft-Zellen.

// Direct alcohol fuel cells with anion exchange membranes

Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) are usually manufactured with highly acidic, perfluorinated sulphonic acid membranes. This makes it necessary to use expensive, platinum-based catalysts both on the anode and cathode. It is possible to reduce the platinum content by replacing acidic with alkaline electrolytes. Strongly basic anion exchange membranes which are stable in strongly alkaline solutions have recently become available.

As part of a project various platinum-free catalysts were compared with platinum-black on electrodes that were prepared on a strongly basic anion exchange membrane, whereby thin-film electrodes were compared with conventionally prepared gas diffusion electrodes. The polarisation curves of the investigated platinum-free electrodes all had higher potentials than the platinum-containing electrode produced using thin-film technology for comparison purposes. Furthermore, it can be seen that electrodes with silver catalysts have the highest open cell potentials. The conventionally prepared gas diffusion electrode (Raney-Ag) showed the highest potential at low current densities.

However, stable operation is no longer possible at current densities above 150 mA/cm². Thin-film electrodes with Fe/Co nano-catalysts could sustain current densities of up to 400 mA/cm². It was demonstrated that high oxygen reduction currents can be sustained in thin-film electrodes on strongly alkaline anion exchange membranes.



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

Das Fachgebiet arbeitet in Kooperation an der Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC)-Technologie. Unsere Kernkompetenzen sind Konstruktion, Charakterisierung und Simulation, Bau von Prototypen und die Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien.

Entwicklung von PEMFC

Die Entwicklung von PEMFC-Komponenten und -Stacks umfasst einen Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 100 kW Leistung. Zielstellung ist die Optimierung von Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit der Brennstoffzellen unter den spezifischen Anforderungen des Einsatzgebietes. Zu den Aufgaben gehören unter anderem die Abschätzung von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit Fragen der Herstelltechnik und Charakterisierung für PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks.

Modellierung, Simulation und experimentelle Charakterisierung

Durch die Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen können Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen zügig optimiert werden. Andererseits ermöglichen moderne Simulationsmethoden auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze. Entscheidend dafür ist die Verifikation der Simulationsergebnisse mit aussagekräftiger Hardware und realitätsnahen Experimenten. Ein Beispiel hierfür ist das Kernthema Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen. Mittels Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie können die Simulationsergebnisse unter realen Betriebsbedingungen verifiziert und eindrucksvoll visualisiert werden. Unsere gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Technologie ermöglicht zeitliche und räumliche Auflösungen, die zu den weltweit besten Werten gehören.

// Our Main Focus

The Fuel Cells research department is working in developing polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) technology. Our core areas of expertise are in their construction, characterisation and simulation, the construction of prototypes, and the development of production and test technologies.

Development of PEMFC

The development of PEMFC components and stacks encompasses performance capacities ranging from just a few watts to 100 kW. The focus is on transferring the scientific and technical findings to practical applications. The aim is to optimise the output, service life, efficiency and compactness of fuel cells in terms of the specific requirements of the respective application areas. Right from the start, tasks have included estimating the ageing processes and error analyses. Further work is concerned with the manufacturing technology used for PEMFC components, cells and stacks.

Modelling, simulation and experimental characterisation

Modelling and simulating processes in fuel cells enable the structures of components and operating conditions to be quickly optimised. In addition, modern simulation methods also enable the development and establishment of completely new innovative approaches. Decisive in this respect is the verification of the simulation results with informative hardware and reality-based experiments. An example here is the core issue of water management within gas diffusion electrodes and gas distribution structures. Neutron radiography and tomography enable simulation results to be verified under realistic operational conditions and impressively displayed. The technology jointly developed with our partners at Helmholtz-Institut Berlin (HZB) achieves temporal and spatial resolutions that are among the best values achieved at other institutes worldwide.



// Contact

Dr. Joachim Scholta

E-Mail: joachim.scholta@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-206

// Mikro-Wassermanagement

Micro Water Management

// Mikro-Wassermanagement durch Optimierung von Brennstoffzellenkomponenten (PEM-CaD)

Für den Zellbetrieb ist vor allem die Flutung von Gasdiffusionslagen (GDL) problematisch. Die Wasseragglomeration verhindert den Transport der Reaktionsgase zur aktiven Schicht und setzt so die Reaktionsaktivität der Brennstoffzelle herab. Ziel des Verbundprojektes „PEM-CaD“ ist die Analyse des Wasserhaushalts im Mikrometerbereich in den einzelnen Schichten der Brennstoffzelle sowie die gezielte Modifikation einzelner Brennstoffzellenkomponenten zur Leistungs- und Lebensdaueroptimierung.

Am Fraunhofer ISE wurden unterschiedliche Gasdiffusionslagen mittels Laser perforiert und in Brennstoffzellen des ZSW integriert. Mittels Synchrotronradiographie können Verteilung und Transport des Wassers im Kanal und in der Gasdiffusionslage während des Zellbetriebs visualisiert werden. Bei dem Verfahren wird die erhöhte Absorption der Röntgenstrahlen von Wasser im Vergleich zu den einzelnen Brennstoffzellenkomponenten ausgenutzt. So konnte abgebildet werden, dass das während der elektrochemischen Reaktion entstehende Produktwasser sich bevorzugt in den künstlich erzeugten Kanälen ansammelt und so Bereiche zwischen den Perforationen zum Gastransport frei bleiben. Es konnte nachgewiesen werden, dass eine gezielte Behandlung der GDL die Gefahr einer Flutung verringert und die Leistung der Brennstoffzelle positiv beeinflusst.

Die experimentell gewonnenen Daten werden innerhalb des Verbundprojekts für Modellierungen von Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und GDL weiterverwendet und komplettieren so die Analyse des Mikro-Wassermanagements.

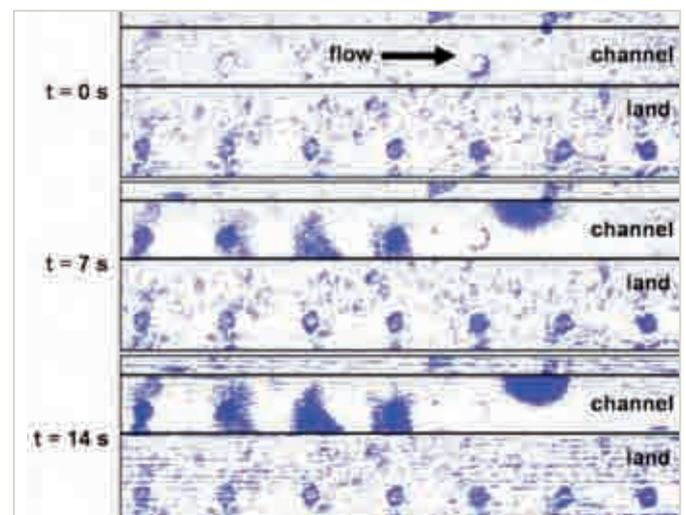
// Synchrotronvisualisierung einer perforierten GDL im Betrieb: Wasseragglomeration in und um die perforierten Löcher herum (Schachbrettmuster), im Kanal sowie unter dem Steg.

// Synchrotron visualisation of a perforated GDL in operation: Water agglomerations in and around the perforated holes (checkerboard pattern), in the channel and under the rib.

// Micro water management through optimising fuel cell components (PEM-CaD)

The flooding of gas diffusion layers (GDL) is problematic for the cell operation. The agglomeration of water prevents the transport of the reaction gases to the active layer and blocks the reaction activity of the fuel cell. The aim of the joint “PEM-CaD” project is to analyse the water balance in the micrometre range in the individual layers of the fuel cell and to specifically modify individual fuel cell components to optimise the performance and service life.

At the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems in Freiburg, different gas diffusion layers were perforated using a laser and integrated in the fuel cells from ZSW. By means of synchrotron radiography, the distribution and transport of the water in the channel and in the gas diffusion layer during the cell operation was visualised. It was shown that targeted treatment of the GDL reduces the risk of flooding and has a positive impact on the performance of the fuel cell.



// Dr. Joachim Scholta

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

Our work focuses on optimising fuel cells with all their components in terms of their output, service life and production.



// PEM-Brennstoffzellen

PEM Fuel Cells

// Experimentelle Untersuchung dynamischer Betriebsbedingungen bei PEM-Brennstoffzellen (Fuel Cell Dynamics)

Alterungsmechanismen spielen eine entscheidende Rolle für die Lebensdauer von Brennstoffzellen. Unter hochdynamischen Betriebsbedingungen, die für automotiv Anwendungen charakteristisch sind, ist die Lebensdauer von Brennstoffzellen geringer als im stationären Betrieb. Die durchgeführten dynamischen Untersuchungen erfolgen in einer Kooperation zwischen dem Dalian Institute of Chemical Physics (DICP) und dem ZSW. Das Ziel des Projektes ist die Identifikation von hochdynamischen Betriebsbedingungen, die – im Vergleich zur stationären Anwendung – zu deutlich schnellerer Brennstoffzellenalterung führen. An ausgewählten Gasdiffusionslagen (GDL) und Flowfield-Designs werden unter dynamischen Betriebsbedingungen mittels ortsaufgelöster Messungen der Stromdichte, der Impedanz und der Temperatur Analysen durchgeführt. Um Alterungseffekte nachzuweisen, wird das Abgas des Brennstoffzellenstacks mit dem NDIR-Verfahren auf CO_2 -Emissionen untersucht.

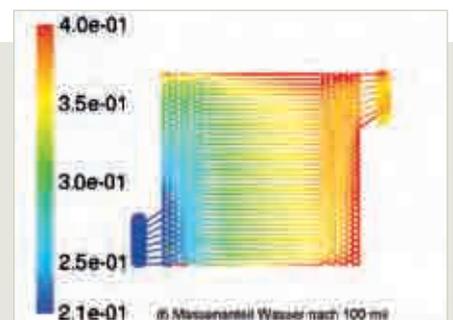
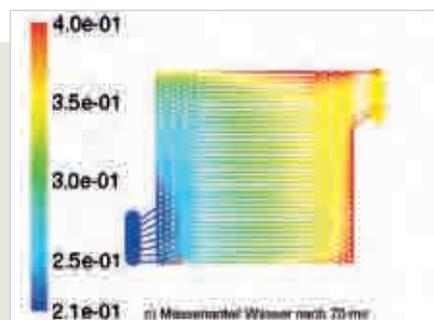
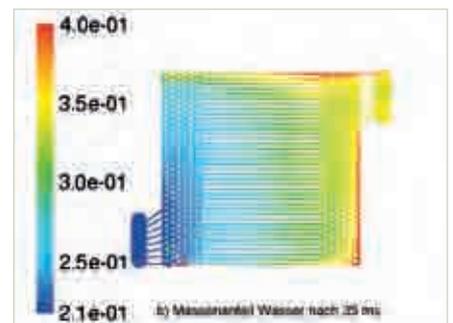
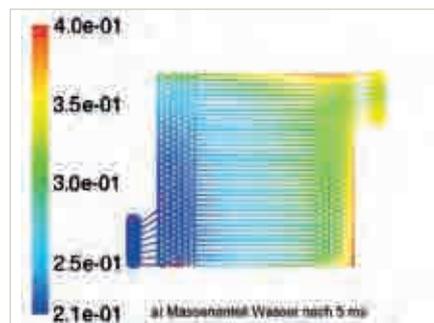
Unterstützend zur experimentellen Vorgehensweise werden dynamische CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) mit ANSYS FLUENT® durchgeführt, um Unterversorgungszustände und kritische Bereiche bei der Gaszusammensetzung, der relativen Feuchte und der Druckverteilung zu identifizieren. Durch Neutronenradiographie-Messungen kann das Wassermanagement innerhalb der Brennstoffzelle analysiert werden. Die aus dem Experiment und der Modellierung erhaltenen Erkenntnisse führen zur Entwicklung eines optimierten Flowfield-Designs, das – in Verbindung mit einer optimierten Betriebsstrategie des Brennstoffzellenstacks – auch für hochdynamische Anwendungen geeignet ist.

// Darstellung des Massenanteils von Wasser in der Flowfield-Ebene bei einem dynamischen Lastsprung (von $0,2 \text{ A/cm}^2$ auf 1 A/cm^2) bei konstantem Massenstrom im Zeitintervall zwischen 5 ms und 100 ms
 // Depiction of the mass portion of water at the flow field level with a dynamic load jump (of $0,2 \text{ A/cm}^2$ to 1 A/cm^2) with a constant mass flow in time intervals between 5 ms and 100 ms

// Experimental investigation of the dynamic operating conditions with PEMFC (fuel cell dynamics)

Ageing mechanisms have a decisive impact on the service life of fuel cells. Under the highly dynamic operating conditions that are characteristic for automotive applications, the service lives of fuel cells are shorter than in stationary operation. ZSW is conducting dynamic investigations in cooperation with the Dalian Institute of Chemical Physics (DICP). The aim of the project is to identify highly dynamic operating conditions that, in comparison to stationary applications, lead to demonstrably quicker fuel cell ageing. Under dynamic operating conditions, analyses are being conducted on selected gas diffusion layers (GDLs) and flow field designs using spatially resolved measurements of the current density, impedance and temperature. In order to determine ageing effects, the exhaust gas from the fuel cell stack is being investigated using the NDIR process in terms of CO_2 emissions.

To support the experimental procedure, dynamic CFD (computational fluid dynamics) simulations are being conducted with ANSYS FLUENT® to identify undersupply situations and critical areas relating to the gas composition, relative humidity and pressure distribution. The findings gained from the experiment and the modelling will lead to the development of an optimised flow field design that is also suitable for highly dynamic applications.



// Gasdiffusionslagen

Gas Diffusion Layers

// Alterung und Wasserhaushalt von Gasdiffusionslagen

Im Rahmen des innerhalb des 7. EU-Rahmenprogrammes angesiedelten europäischen Gemeinschaftsprojektes DECODE mit elf Verbundpartnern aus Industrie und Forschung wird die Alterung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC), Komponenten wie Membran-Elektroden-Einheit (MEA), Gasdiffusionslage (GDL) und Bipolarplatte im Niedertemperaturbetrieb untersucht.

Die Aufgabenstellungen des ZSW umfassen experimentelle Fragestellungen und die Modellierung und Simulation von Brennstoffzellen mit den Untersuchungsschwerpunkten Alterungsprozesse und Wasserhaushalt einer GDL. Die Folgen von Alterungsprozessen werden an der GDL während des Zellbetriebes anhand von Struktur- und Benetzungseigenschaften charakterisiert. Ziel ist es, die Alterungsmechanismen durch geeignete künstliche Alterungsmethoden beschleunigt ex situ nachzustellen, um dadurch verschiedene Einflüsse auf die GDL-Alterung zu identifizieren. Für die Modellierung des Wasserhaushaltes der GDL wurde ein Monte-Carlo-Modell erstellt, mit dem die Folgen von Alterungserscheinungen wie die Reduktion der Hydrophobizität auf die Wasser-Verteilung und -menge in der GDL untersucht werden können.

Die Abbildungen zeigen in einem Ausschnitt aus dem Flowfield (Steg-Kanal-Steg) mit darunterliegender GDL simulierte Wasser-Verteilungen. In den Abbildungen unten sind verschiedene Grade der Hydrophobierung gezeigt, wie sie sich aus Alterungsmechanismen ergeben können. Zur besseren Darstellung des Wassers (blau) sind die festen Strukturen in den Abbildungen nur schwach durch Gitter angedeutet. Man sieht, wie sich das Wasser bevorzugt unter den Stegen des Flowfields ansammelt. Mit abnehmender Hydrophobierung (entsprechend einer gealterten GDL) befindet sich insgesamt eine größere Menge an flüssigem Wasser in der GDL, wodurch der Gastransport in der GDL behindert werden kann.

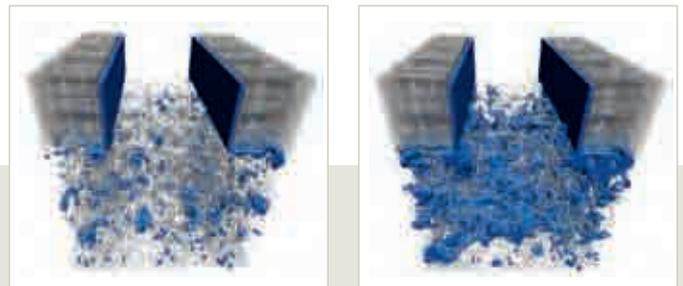


// Ageing and water balance of gas diffusion layers

As part of DECODE, the joint European project being organised under the auspices of the EU's 7th Framework Programme with 11 partners from industry and research, investigations are being conducted on the ageing of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC), components such as the membrane electrode assembly (MEA), the gas diffusion layer (GDL) and bipolar plates in low-temperature operation.

ZSW's tasks include experimental investigations and the modelling and simulation of fuel cells with a particular focus on the ageing processes and water balance of GDLs. The consequences of ageing processes on the GDL during the cell operation are characterised using structure and wetting properties. By means of suitable artificial ageing methods, the aim is to conduct accelerated, ex situ simulations of the ageing mechanisms and thus identify various influences on the GDL ageing. In order to model the water balance of the GDL, a Monte Carlo model was developed that enables the ageing effects, such as a reduction in the hydrophobicity, to be investigated in terms of the water distribution and volume in the GDL.

The illustrations show simulated water distributions in a section from the flow field (rib-channel-rib) with the GDL below. Various stages of hydrophobisation, as can occur as a result of the ageing mechanisms, are shown in the figures below. To enable the water (blue) to be shown better, the fixed structures in the illustrations are only faintly indicated with grids. It can be seen how the water tends to collect under the ribs of the flow field. As the hydrophobisation decreases (corresponding to an aged GDL), the overall volume of fluid water in the GDL increases, which can impede the transport of gas in the GDL.



// Wasserverteilungen aus Simulationen für verschiedene Hydrophobierungsgrade. Abnehmende Hydrophobierung von links nach rechts bewirkt eine zunehmende Wassermenge innerhalb der GDL und unterhalb der Stege.
// Water distributions from simulations for various hydrophobisation stages. Decreasing hydrophobisation from left to right increases the water volume within the GDL and below the ribs.

// Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)

// Unsere Kernkompetenzen

Brennstoffzellensysteme

20 Jahre Erfahrung bilden unsere Basis für die schnelle und professionelle Entwicklung von Brennstoffzellenstacks und -systemen 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.

Reformer für flüssige Brennstoffe

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

// Our Main Focus

Fuel cell systems

20 years of experience form the basis for the rapid and professional development of fuel cell stacks and 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 their control, monitoring and hybridisation with batteries and DC/AC converters. In addition, we provide industry partners with support in developing and testing system components, providing safety assessments, with package studies, and with 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



// HT-PEM-System für stationäre Hausenergieversorgung

HT-PEM System for Residential Heat and Power Supply

// HT-PEMFC-System für stationäre Hausenergieversorgung

Im Rahmen eines vom Land Baden-Württemberg geförderten Zuwendungsprojekts wird ein erdgasbetriebenes Brennstoffzellensystem für die stationäre Hausenergieversorgung mit einer Leistung von 1 kW_{el} aufgebaut. Die Basis dieses Systems bildet ein am ZSW entwickelter Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellenstack (HT-PEMFC). In enger Zusammenarbeit mit einem Industriepartner wird ein neuartiges Systemkonzept entwickelt. Dabei werden die herausragenden Vorteile der HT-PEMFC in Bezug auf den Betrieb mit CO-haltigem Reformatgas genutzt, um die Komplexität des Gesamtsystems zu vereinfachen und um den Wirkungsgrad signifikant zu verbessern. Gleichzeitig werden in diesem Projekt neueste Materialien beim Bau des HT-PEMFC-Stacks eingesetzt.

Erstes Projektziel ist, die intelligente Verschaltung des Reformers mit dem Brennstoffzellen-Stack anhand eines Funktionsmusters zu demonstrieren. Zweites Ziel ist die Weiterentwicklung des Funktionsmusters zu einem industrienahe Fertigungsmuster. In diesem Projekt wird die Expertise aus drei Bereichen des ZSW in hervorragender Weise umgesetzt: Brennstoffzellen-Stackentwicklung, Brennstoffzellen-Systementwicklung sowie Test und Inbetriebnahme von Reformersystemen.

// HT-PEMFC system for residential heat and power supply

Funded with a grant from the Federal State of Baden-Württemberg, a natural gas-operated fuel cell system for residential heat and power with an output of 1 kW_{el} is being constructed. The system is based on a high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stack (HT-PEMFC) developed by ZSW. An innovative system concept is developed in close collaboration with an industrial partner. Here the excellent benefits offered by the HT-PEMFC system in the operation with CO-containing reformat gas are utilised to significantly improve the overall efficiency of the system and to simplify its complexity. Also innovative materials are used in constructing the HT-PEMFC stack.

First aim of the project is to demonstrate the intelligent combination of the reformer and the fuel cell stack in a functional model. Second goal is the enhancement of the functional model towards a production prototype. This project excellently utilises the expertise from three ZSW fields: fuel cell stack development, fuel cell system development and the testing and commissioning of reformer systems.

// HT-PEMFC-System für die stationäre Hausenergieversorgung.
// HT-PEMFC for residential heat and power supply.



// Dr. Alexander Kabza

Der vollautomatisierte Betrieb unserer Brennstoffzellen-Teststände ermöglicht einen unbeaufsichtigten Rund-um-die-Uhr-Betrieb mit minimalem Personalaufwand und entsprechend geringen Kosten.

The fully automated operation of our fuel cell testing facilities enables unsupervised, 24/7 operation with minimum personnel requirements and accordingly low costs.

// Organisation und Verwaltung

Organisation and Administration

// Unsere Kernkompetenzen

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit am ZSW ist nicht allein durch die Labormitarbeiter, Ingenieure und Wissenschaftler erfolgreich. Denn 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.



// Zentrale Dienste
// Central Services



// Leitungsteam Geschäftsbereich Photovoltaik
// Management team for the Photovoltaics Division



// Administration Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien
// Administration team for the Electrochemical Energy Technologies Division



// Service-Team Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien
// Service team for the Electrochemical Energy Technologies Division



// Werkstätten, IT und Bauleitung Workshops, IT and Construction Management



// Werkstatt Stuttgart
// Stuttgart workshop



// Werkstatt elektronisch Ulm
// Electronics workshop, Ulm



// Werkstatt mechanisch Ulm
// Mechanics workshop, Ulm



// Bauleitung Ulm
// Construction Management, Ulm



// IT Stuttgart
// IT Stuttgart



The background of the image is a close-up, slightly blurred view of tall, thin blades of grass, likely wheat or a similar grain, in shades of green and yellow. A semi-transparent green rectangular box is overlaid on the middle of the image, containing white text.

// 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. Auch 2010 haben wir deshalb vieles auf unterschiedlichen Plattformen veröffentlicht. Unser Rückblick vermittelt Ihnen einen Eindruck.

The future of renewable energy sources resides in public acceptance, the commitment of the industry, scientific impulses and political support. The task of the public relations team is to communicate ZSW's research results to the different target groups. For this reason, 2010 again saw many publications on various platforms. Our review provides you with an insight into these activities.

// Autogipfel zur Elektromobilität: Ulmer ZSW-Vorstand mit Konzernmanagern bei Bundeskanzlerin Angela Merkel
Spitzenvertreter der deutschen Automobilindustrie trafen sich am 3. Mai 2010 auf Einladung von Bundeskanzlerin Angela Merkel in Berlin und erörterten die nächsten Schritte auf dem Weg zu einer nachhaltigen Mobilität. Als Vertreter der Forschung nahm Prof. Werner Tillmetz teil, Vorstand am ZSW in Ulm. Thema der Gespräche war unter anderem der effiziente Transfer neuer Technologien in die Wirtschaft. Zusammen mit der Bundesregierung wurde der Startschuss für eine Nationale Plattform Elektromobilität gegeben.

// Car summit on electromobility: ZSW's Ulm director and corporate managers meet Chancellor Angela Merkel
On 3 May 2010, Chancellor Angela Merkel invited top representatives from the German car industry to the Chancellery in order to discuss the next stages en route to sustainable mobility. Prof. Werner Tillmetz, Director of ZSW in Ulm, took part as a representative from the research sector. Among other topics, the discussions were concerned with improving the coordination between research and development. A national platform for electromobility was also launched in conjunction with the German Federal Government.

// Neue Ära der europäischen Hochleistungsbatterien beginnt in Ulm: Spatenstich mit Politik, Wissenschaft und Industrie
Das eLaB wird auf 6.600 m² Platz für Technikumsanlagen zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen und für Batterie-Sicherheitstests bieten. Damit entsteht ein einzigartiges Dienstleistungszentrum für die im Aufbau befindliche Industrie für Fahrzeugbatterien. Bis Juni 2011 soll das Labor für 27 Millionen € bezugsfertig sein. Am 22. Juli 2010 haben mit dem Spatenstich im Ulmer Science Park II die Baumaßnahmen begonnen. Zu den Gästen zählten hochrangige Vertreter aus den Bundes- und Landesministerien, der EU, der Industrie und der Stadt Ulm.

// New era in European high-performance batteries begins in Ulm: Groundbreaking ceremony with representatives from politics, science and industry
Across 6,600 m², the eLaB will provide space for laboratory systems for manufacturing lithium-ion cells and battery safety tests. This thus creates a unique service centre for the emerging vehicle battery industry. The € 27 million laboratory is scheduled to be completed by June 2011. On 22 July 2010, the construction measures were officially launched with a groundbreaking ceremony in Ulm's Science Park II. The guests included high-ranking representatives from the federal and regional ministries, the EU, industry and the City of Ulm.



// eLaB-Spatenstich am 22. Juli 2010.

// eLaB groundbreaking ceremony on 22 July 2010.

// GRACIS-Industrieworkshop zu chemischen Gradienten in CIGS-Solarzellen

Am 15. November bot das ZSW in Stuttgart einen ganztägigen Workshop für Industrievertreter von CIGS-Dünnschicht-Solarfirmen aus Deutschland an. Diese konnten sich mit einem Expertengremium der beteiligten Projektpartner über Diffusionsvorgänge und Analysemethoden an Cu(In,Ga)(S,Se)_2 -Solarzellenmaterial austauschen. Die ZSW-Forscher präsentierten Ergebnisse des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojektes „Chemische Gradienten in Cu(In,Ga)(S,Se)_2 : Ursachen und Konsequenzen“, kurz GRACIS. Eine Postersession bot die Möglichkeit zur Diskussion und zu direktem Informationsaustausch zwischen Industrievertretern und Wissenschaftlern.

// Erneuerbare Energien im Interesse der Öffentlichkeit

Im Geschäftsjahr 2010 präsentierte sich das Institut mit seinen Forschungsschwerpunkten auf namhaften internationalen Fachmessen mit innovativen Forschungsergebnissen und Produktentwicklungen.

Dabei sind nachfolgende Veranstaltungen zu nennen:

6 th User Forum Thin-film Photovoltaics, Würzburg	8.–9.2.2010
25. Symposium für photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	3.–5.3.2010
Hannover Messe Industrie	19.–23.4.2010
Intersolar Europe, München	9.–11.6.2010
IPHE Workshop Governmental Programmes on E-Mobility, Ulm	15.6.2010
12. Ulmer Elektrochemische Tage (UECT)	16.–17.6.2010
Aktionstag „Ohne Auto.mobil“, Widderstall	18.7.2010
25 th EU-PVSEC and 5 th WCPEC, Valencia	6.–10.9.2010
f-cell, Stuttgart	27.–28.9.2010
Highlights der Physik, Augsburg	9.–14.10.2010

// GRACIS Industry Workshop on chemical gradients in CIGS solar cells

On 15 November, ZSW in Stuttgart hosted a one-day workshop for industry representatives from German CIGS thin-film companies. Together with an expert panel from the participating project partners, they were able to discuss diffusion processes and analysis methods for Cu(In,Ga)(S,Se)_2 solar cell material. ZSW researchers presented the results of the joint project entitled “Chemical gradients in Cu(In,Ga)(S,Se)_2 : causes and consequences,” or GRACIS for short, which was funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). A poster session provided an opportunity to discuss and share information between the industry representatives and the scientists.

// Renewable energy sources in the public interest

In 2010, the institute presented itself and its key research areas at renowned international trade fairs with innovative research results and product developments.

These included the following events:

6 th User Forum Thin-film Photovoltaics, Würzburg	08–09/02/2010
25 th Symposium on Photovoltaic Solar Energy, Bad Staffelstein	03–05/03/2010
Hanover Industrial Trade Fair	19–23/04/2010
Intersolar Europe, Munich	09–11/06/2010
IPHE Workshop Governmental Programmes on E-Mobility, Ulm	15/06/2010
12 th Ulm ElectroChemical Talks (UECT)	16–17/06/2010
“Car-free” action day, Widderstall	18/07/2010
25 th EU-PVSEC and 5 th WCPEC, Valencia	06–10/09/2010
f-cell, Stuttgart	27–28/09/2010
Physics Highlights, Augsburg	09–14/10/2010



// ZSW-Stand auf der 25th EU-PVSEC in Valencia.
 // ZSW booth at the 25th EU-PVSEC in Valencia.

// ZSW auf der Intersolar und der 25. EU-PVSEC

Mit großem Erfolg präsentierte sich der Geschäftsbereich Photovoltaik auf der Intersolar Europe in München sowie auf der EU-PVSEC in Valencia. Dort wurden jeweils die Dienstleistungen des am 2. Februar eröffneten Solab vorgestellt – teils mit den ergänzenden Analytikangeboten des Fachgebiets Photovoltaik: Materialforschung. Gerade angesichts der im Jahr 2010 erzielten Effizienz-Weltrekorde bei CIGS-Dünnschichtmodulen (20,1 % und 20,3 %) war diese Präsenz wichtig und erregte viel Aufmerksamkeit in der Photovoltaikbranche.

// Technologien für den Serienstart in die Elektromobilität: 12. Ulm ElectroChemical Talks (UECT)

Die vom ZSW ausgerichteten UECT zu Batterien und Brennstoffzellen sind ein weltweiter Treffpunkt für Forscher und Techniker und haben in Expertenkreisen schon Tradition. Doch diesmal war alles anders: Elektromobilität ist zum internationalen Megatrend geworden und ließ die Bedeutung der alle zwei Jahre stattfindenden Fachkonferenz 2010 nochmals deutlich steigen. Zum ersten Mal trafen sich jetzt auch Regierungsvertreter aus der ganzen Welt, um über Markteinführungsprogramme für die Elektromobilität zu diskutieren. Aktuelles Thema war der Serienstart in die Elektromobilität. An der Konferenz nahmen 250 Experten aus 18 Ländern teil. Alle Details dazu finden Sie unter www.uct.de.



// Verleihung 12. UECT Award: v.l.n.r. Prof. Garche, Dr. Malinowski, Prof. Tillmetz, Dr. von Helmholt.
 // Presentation of the 12th UECT awards. From left to right: Prof Garche, Dr Malinowski, Prof Tillmetz and Dr von Helmholt.

// ZSW at Intersolar and the 25th EU-PVSEC

The Photovoltaics Division enjoyed a very successful appearance at Intersolar Europe in Munich and at the EU-PVSEC in Valencia. The various services provided by Solab, which was inaugurated on 2 February, were presented there – partly in conjunction with the supplementary analysis services offered by the Photovoltaics: Materials Research department. It was particularly important to have a presence given the two efficiency world records achieved by ZSW in 2010 with thin-film modules (20.1% and 20.3%), which attracted a great deal of attention in the PV industry.

// Technologies for the market launch of electromobility: 12th Ulm ElectroChemical Talks (UECT)

The UECT conference on batteries and fuel cells is a worldwide meeting place for researchers and technicians and has become a firm date in the calendar within expert circles. But this time everything was different: Electromobility has become an international mega-trend and this considerably increased the significance of the biannual conference's 12th session. For the first time, government representatives from all over the world were also present to discuss the market launch programmes for electromobility, whereby the current focus is on achieving mass production in the electromobility industry. 250 experts from 18 countries took part in the conference, which was held from 15 to 17 June 2010. You can find further details at www.uct.de.



// ZSW-Stand auf der Intersolar Europe in München.
 // ZSW booth at Intersolar Europe in Munich.



// ZSW-Stand auf der Hannover Messe Industrie 2010.
 // ZSW booth at the 2010 Hanover Industry Trade Fair.

// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations



// Eine Delegation des Wirtschafts- und des Finanzministeriums Baden-Württemberg besichtigt den Reinraum im ZSW Stuttgart.

// A delegation from the Baden-Württemberg Ministries of Economics and Finance visits the clean room at ZSW Stuttgart.

// Medienarbeit

Die Pressearbeit des ZSW konnte in Zusammenarbeit mit externen Partnern erfolgreich weiterentwickelt werden. Insgesamt wurden rund 800 Presseergebnisse erzielt – ein neuer Rekord!

Die beste Resonanz erzielten folgende Forschungsthemen:

- > Erdgas aus Ökostrom (Power-to-Gas)
- > Effizienz-Weltrekord bei CIGS-Dünnschicht-Solarzellen
- > Spatenstich eLaB
- > Studie zur Lithium-Verfügbarkeit

Das Thema „Erdgas aus Ökostrom“ zog 2010 außerordentlich große Kreise in der Öffentlichkeit. Wir zählten rund 120 Medien-ergebnisse in folgenden Kategorien:

- | | |
|---|----|
| > TV/Radio: | 8 |
| > Zeitungen/Zeitschriften überregional: | 19 |
| > Zeitungen/Zeitschriften regional: | 7 |
| > Fachzeitschriften | 41 |
| > Elektronische Medien | 49 |

Zu den wichtigsten Medien gehörten das ARD-Nachtmagazin, Deutschlandradio, DIE ZEIT, Bild der Wissenschaft, Wirtschaftswoche und Financial Times Deutschland.

// Media relations

ZSW was able to successfully develop its public relations work in cooperation with external partners. Around 800 press mentions were achieved – a new record!

The best response was generated by the following research topics:

- > Natural gas from green electricity (Power-to-Gas)
- > Efficiency world record for CIGS thin-film solar cells
- > Groundbreaking ceremony for the eLaB
- > Study on lithium availability

The generation of natural gas from green electricity generated considerable public interest in 2010. We counted around 120 media mentions in the following categories:

- | | |
|----------------------------------|----|
| > TV/Radio: | 8 |
| > National newspapers/magazines: | 19 |
| > Regional newspapers/magazines: | 7 |
| > Specialist journals | 41 |
| > Electronic media | 49 |

The most important media outlets included ARD-Nachtmagazin (TV), Deutschlandradio (radio), DIE ZEIT, Bild der Wissenschaft, Wirtschaftswoche and Financial Times Deutschland (newspapers/magazines).

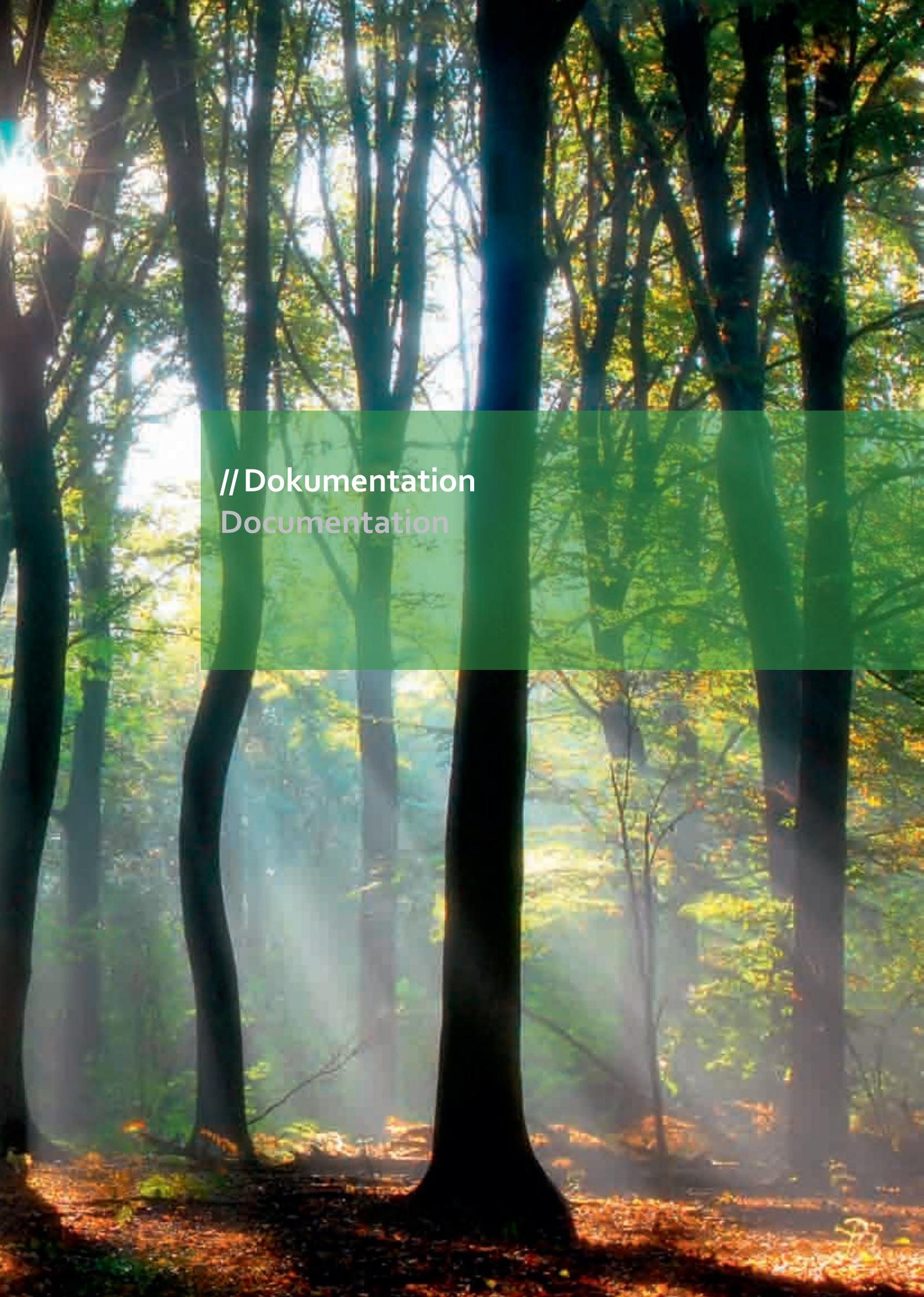


// Besuch einer koreanischen Delegation im Modultestlabor Solab.
// A delegation from South Korea visits the module test laboratory Solab.



// Expertenworkshop „Brennstoffzellen auf dem Prüfstand“.
// Expert's workshop at ZSW Ulm "Fuel Cells put to the Test".





// Dokumentation
Documentation

// Haushalt Budget Development



// Haushalt

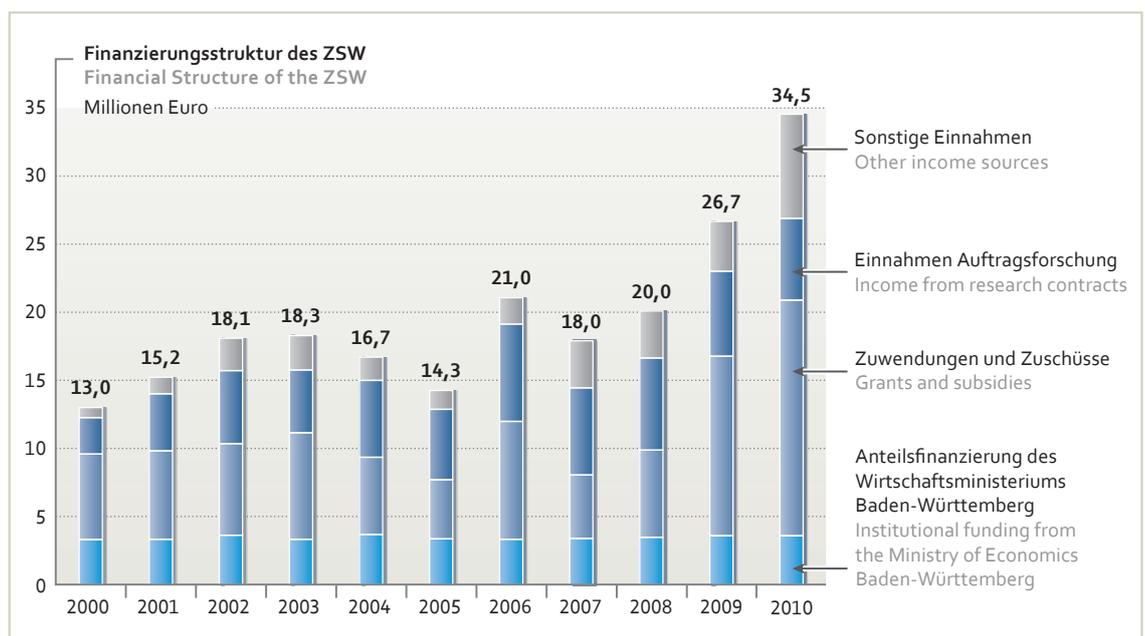
Das Einnahmenvolumen betrug im abgelaufenen Jahr 34,5 Mio. € und lag damit um mehr als 20 % über dem Wert des Vorjahres. Die Erträge aus Auftragsforschung erreichten wieder das Niveau des Vorjahres, während der Anteil der öffentlichen Zuwendungen – vor allem durch Investitionsprojekte aus dem Konjunkturpaket der Bundesregierung, aus Sondermitteln der EU und des Landes Baden-Württemberg – den Planansatz und den Vorjahreswert wieder deutlich übertraf. Die Investitionsmittel wurden vorrangig für den Neubau des ZSW-Labors für Batterietechnologie eLaB in Ulm eingesetzt, das im Jahr 2011 fertiggestellt wird. In geringerem Umfang profitierte in Stuttgart die Infrastruktur für das Modultestlabor Solab sowie das Labor für neue Materialien in der Dünnschicht-Photovoltaik.

Die erfolgreiche Akquisition des vergangenen Jahres führte insgesamt in allen Geschäftsbereichen zu einer guten Auslastung der Forschungskapazität und, bedingt durch eine gleichzeitig

// Budget

In the past year, the income volume amounted to €34.5 million, which was therefore around 20% higher than in the previous year. The revenues from contract research again achieved the level of the previous year, whereas the proportion of public subsidies, particularly for investment projects funded as part of the German government's economic stimulus package or with special grants from the EU and the Federal State of Baden-Württemberg, again considerably exceeded the planned level and the previous year's value. The investment capital was primarily used for constructing ZSW's new eLaB laboratory for battery technology in Ulm, which will be completed in 2011. In Stuttgart, the infrastructure for the Solab module test laboratory also benefited to a lesser extent, as did the laboratory for new materials in thin-film photovoltaics.

On the whole, the successful acquisition in the past year led, in all departments, to good utilisation of research capacity and (due to the more rational management which took place at the same



rationellere Bewirtschaftung, zu einer verbesserten Kostendeckung. Der Anteil der institutionellen Förderung des Landes Baden-Württemberg (3,6 Mio. € im Jahr 2010) bleibt nahezu unverändert.

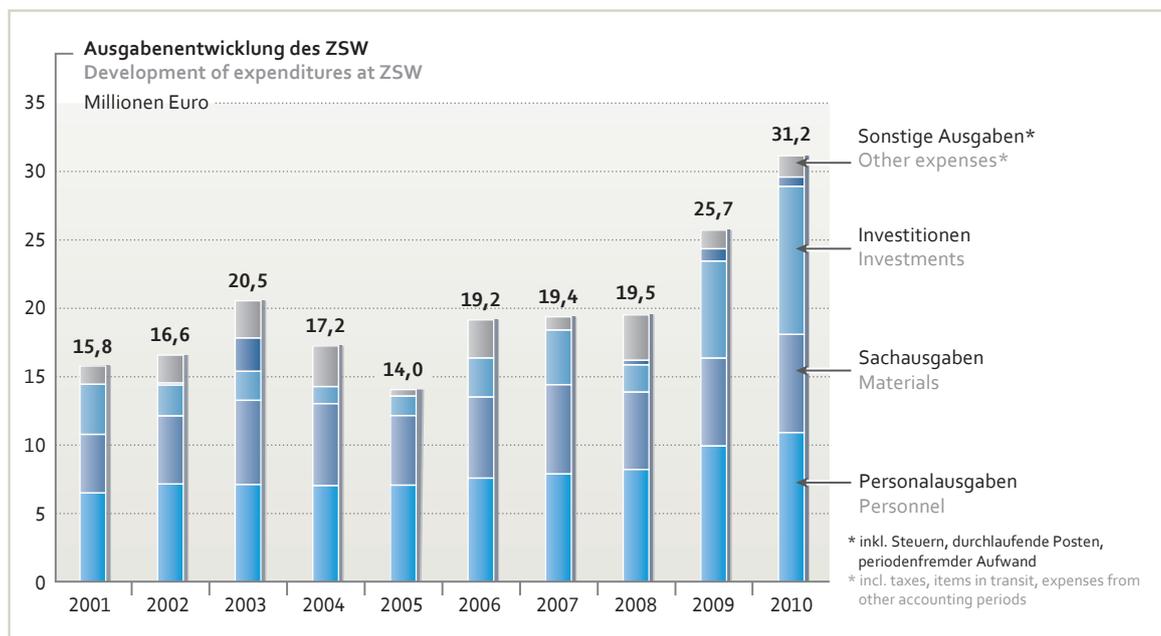
Die Gesamtausgaben lagen mit 31,1 Mio. €, korrespondierend zur erfolgreichen Einwerbung von Investitionsprojekten, deutlich über dem Vorjahr. Die Personalausgaben stiegen aufgrund der projektbedingten Ausweitung der Kapazität an.

Im Hinblick auf den gesamten Kofinanzierungsbedarf im Bereich der öffentlichen Zuwendungen gilt unverändert, dass die Sicherung der erreichten Drittmittelquote bei gleichzeitig wachsender Industrienähe eine entscheidende Voraussetzung für den Erfolg des ZSW ist.

time) to better cost recovery. The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg (€3.6 million in 2010) remained almost the same.

The total expenditure amounted to €31.1 million, which, in accordance with the successful acquisition of investment projects, is considerably higher than in the previous year. The personnel expenditure rose as a result of the project-based increase in capacities.

In view of the overall co-funding requirements in regards to public subsidies, it is still the case that the successful acquisition of third party funds, combined with a growing closeness to industry, are the decisive prerequisites for ZSW's success.



// Personalentwicklung Staff Development



// Personalentwicklung

Wie in der mittelfristigen Finanzplanung und dem Wirtschaftsplan beabsichtigt, hat sich der Wachstumstrend beim Personal 2010 weiter fortgesetzt. Die Mitarbeiterkapazität erreichte zum 31. Dezember 170,5 Vollzeitstellen und damit den höchsten Wert seit Bestehen des Instituts. Dies entspricht 185 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Mit einem Anteil von 83% des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist nach wie vor eine hohe Produktivität gegeben.

Die Quote der unbefristeten Arbeitsverträge ist 2010 gegenüber dem Vorjahr leicht gestiegen und liegt jetzt bei 62% aller Beschäftigten. Im wissenschaftlich-technischen Bereich liegt der Anteil der befristeten Arbeitsverträge bei 55%.

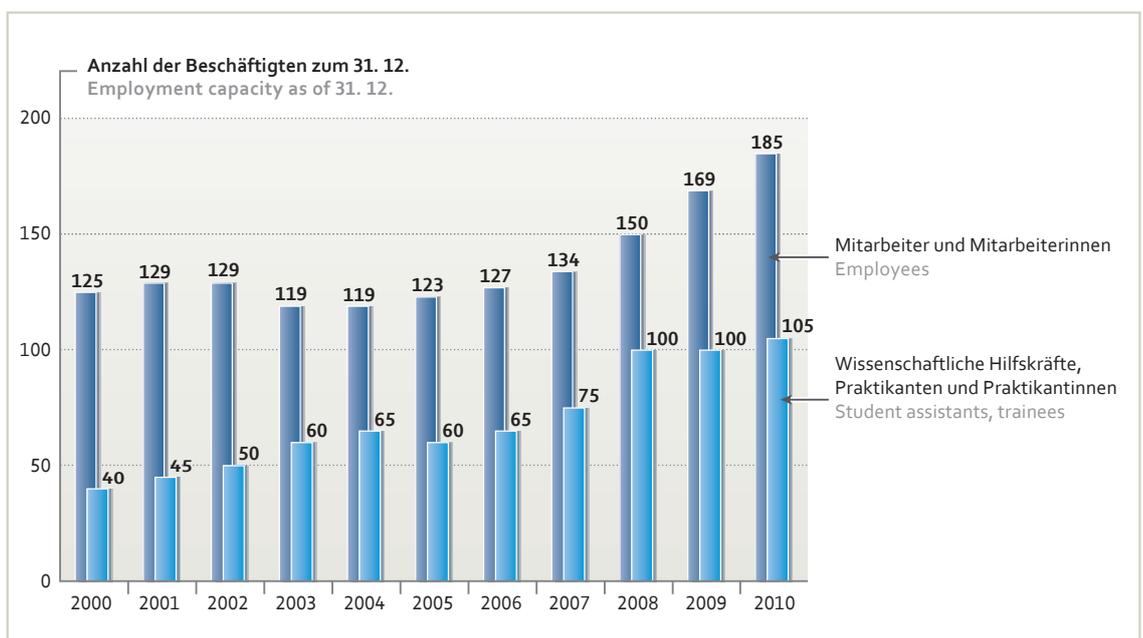
Insgesamt befinden sich derzeit sechs Auszubildende am Institut. In der mechanischen Werkstatt Stuttgart werden derzeit drei Auszubildende zum Industriemechaniker ausgebildet. In Kooperation mit der Universität Stuttgart und der Lehrwerkstatt der Daimler AG werden dort wichtige Prüfungsinhalte abgedeckt.

// Staff development

In accordance with our medium-term financial and economic plan, staff numbers continued to increase in 2010. By 31 December, the staff capacity reached 170.5 full-time equivalent positions, which represents the highest capacity since the institute's founding. This corresponds to 185 employees. With 83% of all staff active in the scientific and technical area, a high level of productivity is still being achieved.

In 2010, the share of permanent employment contracts rose slightly in comparison to the previous year and now covers 62% of all employees. In the scientific and technical areas, 55% of those employed had fixed-term employment contracts.

There are currently six apprentices working at the institute. Three apprentices are training to become industrial mechanics at the mechanical workshop in Stuttgart. Important examination content is covered there in cooperation with Stuttgart University and the apprentice workshop at Daimler AG.





Im Berichtsjahr arbeiteten am Institut 22 Doktoranden an ihrer Dissertation. Neben den nach dem Tarifvertrag der Länder beschäftigten Mitarbeitern sind am ZSW über 100 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 Studienarbeiten, Abschlussarbeiten und Dissertationen. Im Berichtszeitraum waren acht Wissenschaftler des Instituts in der Lehre tätig.

An einer vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg initiierten Veranstaltung über die „Vernetzung und Qualifizierung – erfolgreiche Handlungsstrategien für Wissenschaftlerinnen in der wirtschaftsnahen außeruniversitären Forschung“ nahmen sechs Wissenschaftlerinnen teil. Ein Ziel der Veranstaltung war, Frauen für Führungspositionen zu qualifizieren.

Die Fort- und Weiterbildung, sowohl mit fachspezifischen als auch mit fachübergreifenden Inhalten, wurde mit sehr großem Erfolg in Anspruch genommen. Insgesamt fanden über 25 Fortbildungsveranstaltungen statt, an denen nahezu 100 Beschäftigte teilnahmen.

In the year under review, 22 PhD students worked on their theses at the institute. About 100 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. During the period under review, eight scientists from the institute were involved in teaching.

Six female scientists took part in an event initiated by the Baden-Württemberg Ministry of Economics on “Networking and qualifications – successful strategies for female scientists in commercially related non-university research”. One of the aims of the event was to train women for leading positions.

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 100 employees took part.

// Veröffentlichungen Publications



// Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften // Publications in Books and Journals

- / Caballero R. (HZB), Izquierdo-Roca V. (Univ. de Barcelona), Fontané X. (IREC), Kaufmann C.A. (HZB), Álvarez-García J. (CRIC), Eicke A., Calvo-Barrio L. (Univ. de Barcelona), Pérez-Rodríguez A. (Univ. de Barcelona), Schock H.-W. (HZB), Morante J.R. (Univ. de Barcelona); **Cu deficiency in multi-stage co-evaporated Cu(In,Ga)Se₂ for solar cells applications: Microstructure and Ga in-depth alloying**; Acta Materialia 58 (2010) 3468-3476
- / Diekmann J. (DIW), Groba F. (DIW), Vogel-Sperl A., Püttner A., van Mark K., Mayer J. (AEE Berlin), Ziller U. (AEE Berlin); **Vergleich der Bundesländer: Analyse der Erfolgsfaktoren für den Ausbau der Erneuerbaren Energien 2010 – Indikatoren und Ranking**; im Auftrag und in Kooperation mit der Agentur für Erneuerbare Energien e. V., 2010
- / Friedlmeier T., Witte W., Hempel W., Menner R.; **Characterization and monitoring technologies for CIGS**; The Rise of Thin-Film Solar Technology, The 2010 Thin-Film Annual, Tom Cheyney, Photovoltaics International (eds.) (2010) pp. 139-145
- / Hassoun J. (Univ. of Rome), Reale P. (Univ. of Rome), Panero S. (Univ. of Rome), Scrosati B. (Univ. of Rome), Wachtler M., Fleischhammer M., Kasper M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Determination of the safety level of advanced lithium ion battery having a nanostructured Sn-C anode, a high voltage LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ cathode, and a polyvinylidene fluoride-based gel electrolyte**; Electrochimica Acta 55 (2010) 4194-4200
- / Heinß J.-P. (FEP), Händel F. (FEP), Meyer T. (FEP), Würz R.; **High productive deposited Mo layers for back ohmic contacts of solar cells**; Plasma Processes and Polymers (6) (2009) 29-35
- / Kelm T., Staiß F.; **Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2009**; Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg (Hg.), Oktober 2010
- / Klages M., Krüger P., Haußmann J., Markötter H. (HZB), Riesemeier H. (BAM), Hartnig C., Manke I. (HZB), Scholta J.; **Untersuchung des Einflusses von GDL-Eigenschaften auf den Wasserhaushalt mittels Neutronenradiographie**; MP Materials Testing 10/2010, Vol. 52
- / Krüger P., Markötter H. (HZB), Haußmann J., Klages M., Arlt T. (HZB), Riesemeier H. (BAM), Hartnig C., Manke I. (HZB), Scholta J.; **Dreidimensionale Untersuchung der Wasserverteilung in einer Miniatur-PEM-Brennstoffzelle**; MP Materials Testing 10/2010, Vol. 52
- / Lehr U. (GWS), Lutz C. (GWS), Koroshun O. (GWS), Edler D. (DIW), O'Sullivan M. (DLR), Nitsch J. (DLR), Nienhaus K. (DLR), Breitschopf B. (ISI), Bickel P., Ottmüller M.; **Erneuerbar beschäftigt – Kurz- und langfristige Arbeitsplatzwirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Berlin, September 2010
- / Mancini M., Kubiak P., Wohlfahrt-Mehrens M., Marassi R. (Univ. Camerino); **Mesoporous anatase TiO₂ electrodes modified by metal deposition: Electrochemical characterization and high-rate performances**; Journal of the Electrochemical Society 157 (2) (2010)
- / Musiol F., Nieder T.; **Erneuerbare Energien in Deutschland – Aktueller Sachstand für das Jahr 2009**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), September 2010
- / Musiol F., Nieder T., Ottmüller M., Zimmer U., Memmler M. (UBA), Mohrbach E. (UBA), Moritz S. (UBA), Schneider S. (UBA); **Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), 18.3.2010
- / Musiol F., Nieder T., Ottmüller M., Zimmer U., Memmler M. (UBA), Mohrbach E. (UBA), Moritz S. (UBA), Schneider S. (UBA); **Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Juni 2010
- / Musiol F., Ottmüller M., Nieder T.; **Auf dem Weg zur Zielerreichung 2020: Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2009**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 09/2010
- / Naghavi N. (IRDEP), Abou-Ras D. (HZB), Allsop N. (HZB), Barreau N. (INM), Bücheler S. (EMPA), Ennaoui A. (HZB), Fischer C.-H. (HZB), Guillen C. (CIEMAT), Hariskos D., Herrero J. (CIEMAT), Klenk R. (HZB), Kushiya K. (Showa Shell), Lincot D. (IRDEP), Menner R., Nakada T. (Ayoama Gakuin Univ.), Platzer-Björkmann C. (Uppsala Univ.), Spiering S., Tiwari A.N. (EMPA), Törndahl T. (Uppsala Univ.), Spiering S., Tiwari A.N. (EMPA), Törndahl T. (Uppsala Univ.); **Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based thin film photovoltaics: present status and current developments**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications 18 (2010) 411-433
- / Niki S. (AIST), Contreras M. (NREL), Repins I. (NREL), Powalla M., Kushiya K. (Showa Shell), Ishizuka S. (AIST), Matsubara K. (AIST); **CIGS absorbers and processes**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications 18:453-466 (2010)
- / Pfanzelt M., Kubiak P., Fleischhammer M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **TiO₂ rutile – An alternative anode material for safe lithium-ion batteries**; Journal of Power Sources, 2010
- / Püttner A., Musiol F.; **Verbrauchsgebundene Heizkosten für erneuerbare und konventionelle Energieträger im Vergleich – Kurzstudie Update 2009**; im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien e. V., Stuttgart, Oktober 2010

/ Schlesiger R. (Univ. Münster), Oberdorfer C. (Univ. Münster), Würz R., Grewe G. (Univ. Münster), Stender P. (Univ. Münster), Artmeier M. (Univ. Münster), Pelka P. (Univ. Münster), Spaleck F. (Univ. Münster), Schmitz G. (Univ. Münster); **Design of a laser-assisted tomographic atom probe at Münster University**; Review of Scientific Instruments, 81 (2010) 043703

/ Schmid J. (IWES), Hauer A. (ZAE), Schmidt D. (IBP), Stadermann G. (FVEE), Sterner M. (IWES), Schmidt M., Staiß F., Püttner A., Stryi-Hipp G. (ISE), Nitsch J. (DLR), Rohrig K. (IWES), Busmann H.-G. (IWES), Leprich U. (IZES), Szczepanski P. (FVEE); **Energiekonzept 2050 – Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100% erneuerbaren Energien**; Fachausschuss „Nachhaltiges Energiesystem 2050“ des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien, Juni 2010

/ Slobodskyy A. (KIT), Slobodskyy T. (KIT), Ulyanenkova T. (KIT), Doyle S. (KIT), Powalla M., Baumbach T. (KIT), Lemmer U. (KIT); **In-depth analysis of $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ film for solar cells, structural and optical characterization**; Applied Physics Letters 97, 251911 (2010)

/ Slobodskyy A. (KIT), Wang D. (KIT), Scherer T. (KIT), Kübel C. (KIT), Zhang Z.-H. (KIT), Müller E. (KIT), Gerthsen D. (KIT), Powalla M., Lemmer U. (KIT); **Optical and charge transport properties of a $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ solar cell cross section**; Physical Review B 82, 201105(R) (2010)

/ Specht M., Brellocks J., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz / Storage of bio energy and renewable electricity in the natural gas grid**; Erdöl, Erdgas, Kohle, Heft 10 (2010), S. 342

/ Stolwijk N.A. (Univ. Münster), Obeidi Sh. (Univ. Münster), Bastek J. (Univ. Münster), Würz R., Eicke A.; **Fe diffusion in polycrystalline $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ layers for thin-film solar cells**; Applied Physics Letters 96, 244101 (2010)

/ Täubert C., Fleischhammer M., Wohlfahrt-Mehrens M., Wietelmann U. (Chemetall), Buhrmester T. (Chemetall); **LiBOB as electrolyte salt or additive for lithium-ion batteries based on $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ graphite**; Journal of the Electrochemical Society 157 (6) A721-A728 (2010)

/ Turak A. (MPI-MF), Hanisch J., Barrera E. (MPI-MF), Welzel U. (MPI-MF), Widmaier F., Ahlswede E., Dosch H. (MPI-MF); **Systematic analysis of processing parameters on the ordering and performance of working poly(3-hexyl-thiophene)-[6,6]-phenyl C61-butyric acid methyl ester solar cells**; Journal of Renewable and Sustainable Energy 2, 053103 (2010)

/ Ungelenk J., Haug V., Quintilla A., Ahlswede E.; **CuInSe_2 low-cost thin-film solar cells made from commercial elemental metallic nanoparticles**; Phys. Status Solidi RRL 4, No. 3-4, 58-60 (2010)

// Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

// Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

/ Axmann P.; **From LiFePO_4 to higher voltage lithium metal phosphates**; 5th Japanese-Italian-German Conference, Sendai, 26–27 Oct. 2010

/ Axmann P., Memm M., Kirchmann M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **From LiFePO_4 to higher voltage lithium metal phosphates**; 3rd International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications (ABAA-3), Seoul, 8–10 Sept. 2010

/ Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E.; **Sputtered $\text{ZnO}:\text{Al}$ recombination layer for flexible organic tandem solar cells**; 3rd International Symposium on Flexible Organic Electronics, Ouranopolis, 6–9 July 2010

/ Bonucci A. (SAES Getters), Longoni G. (SAES Getters), Rondena S. (SAES Getters), Salomon O., Wischmann W.; **Ultra-long lifetime of thin-film CIGS PV modules up to 3000 hours damp heat stability using a novel edge sealing “getter” tape**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010

/ Bonucci A. (SAES Getters), Longoni G. (SAES Getters), Salomon O., Wischmann W.; **Ultra-long lifetime of thin-film CIGS PV modules up to 3000 hours damp heat stability using a novel edge sealing “getter” tape**; Renewable Energy 2010, International Exhibition, Yokohama, 30 June–2 July 2010

/ Bouttemy M. (ILV), Tran-Van P. (ILV), Gerard I. (ILV), Causier A. (ILV), Etcheberry A. (ILV), Pelouard J.L. (LPN), Jehl Z. (IRDEP), Naghavi N. (IRDEP), Voorwinden G. (WERes), Dimmler B. (WERes), Powalla M., Guillemoles J.F. (IRDEP), Lincot D. (IRDEP); **Thinning of CIGS solar cells: Part I: Chemical processing in acidic bromine solutions**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010

/ Carlsson A., Krüger Ph., Kuhn R., Arlt T. (HZB), Kaczerowski J., Kardjilov N. (HZB), Jörissen L., Scholta J., Manke I. (HZB), Hartnig C.; **In situ visualization of liquid water formation and transport processes in PEM fuel cells with ex-situ degraded GDL**; 18th World Hydrogen Energy Conference, Essen, 16–21 May 2010

/ Cojocaru-Mirédin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Würz R., Raabe D. (MPIE); **Atomic-scale distribution of impurities in CuInSe_2 -based thin-film solar cells**; 52nd International Field Emission Symposium, Sydney, 5–8 July 2010

/ Cojocaru-Mirédin O. (MPIE), Choi P. (MPIE), Würz R., Raabe D. (MPIE); **Impurity segregation at CuInSe_2 grain boundaries**; 3rd International Conference “Advanced Composite Materials Engineering”, Brasov, 27–29 Oct. 2010

// Veröffentlichungen Publications



- / Colman A. (KIT), Pütz A. (KIT), Klein M. (KIT), Reinhard M. (KIT), Czolk J. (KIT), Kayser C. (KIT), Lemmer U. (KIT), Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E., Powalla M.; **Polymer solar cells with power conversion efficiencies approaching 6%**; 3rd International Symposium on Flexible Organic Electronics, Ouranopolis, 6–9 July 2010
- / Dominé D. (SUPSI-ISAAC), Jagomägi A. (Tallinn Univ.), Guérin de Montgareuil A. (CEA/INES), Friesen G. (SUPSI-ISAAC), Möttus E. (Tallinn Univ.), Mohring H.-D., Stellbogen D., Betts T. (Loughborough Univ.), Gottschalg R. (Loughborough Univ.), Zdanowicz T. (WrUT), Prorok M. (WrUT), Fabero F. (CIEMAT), Faiman D. (Ben Gurion Univ.), Herrmann W. (TÜV-Rheinland); **Uncertainties of PV module – Long-term outdoor testing**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Döring H., Jossen A., Brazel H.; **Safety testing of Li-ion batteries**; Large Lithium Ion Battery Technology and Application, Mainz, 3 Feb. 2010
- / Ebert G. (ISE), Tillmetz W., Specht M., Sterner M. (IWES), Krautkremer B. (IWES), Pregger D. (DLR), Kuckshinrichs W. (FZJ); **Zukünftige Mobilität auf Basis erneuerbarer Energien**; Themen 2009 – Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien, FVEE, S. 104, Berlin, 2010
- / Eicke A., Ciba T., Hariskos D., Witte W.; **Charakterisierung von (Zn,Mg)O/ZnS-Pufferschichten in Cu(In,Ga)Se₂-Dünnschichtsolarellen mit SIMS und SNMS**; 16. Arbeitstagung Angewandte Oberflächenanalytik AOFA 16, Kaiserslautern, 27.–30.9.2010
- / Felder M., Kaifel A., Huckle R.; **Towards a NNORSY ozone profile ECV from European nadir UV/VIS measurements**; European Space Agency Living Planet Symposium, Bergen, 28 June–2 July 2010
- / Garche J., Parker N. (BMVBS), Bonhoff K. (NOW), Wohlfahrt-Mehrens M.; **The German federal government's strategy for electric mobility**; 3rd International Conference on Advanced Lithium Batteries for Automobile Applications (ABAA-3), Seoul, 8–10 Sept. 2010
- / Geyer D.; **Vorschlag für das Testen flexibler Dünnschicht-Solarmodule**; 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 3.–5.3.2010
- / Günther C., Jossen A., Späth V.; **Lebensdauermodell für Lithium-Ionen-Batterien – Lifetime models for lithium-ion batteries**; 2. Symposium „Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“, Mainz, 1.–2.2.2010
- / Günther C., Schott B., Jossen A. (TUM), Linßen J. (FZJ); **Grid integration of electrical power train systems in existing and future energy supply structures - Development of a battery model considering aging and costs**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Güttler D. (EMPA), Chirila A. (EMPA), Blösch P. (EMPA), Seyrling S. (EMPA), Buecheler S. (EMPA), Eicke A., Tiwari A.N. (EMPA); **Influence of NaF incorporation during Cu(In,Ga)Se₂ growth on microstructure and photovoltaic performance**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010
- / Güttler D. (EMPA), Chirila A. (EMPA), Seyrling S. (EMPA), Blösch P. (EMPA), Buecheler S. (EMPA), Fontané X. (IREC), Izquierdo-Roca V. (Univ. de Barcelona), Calvo-Barrio L. (Univ. de Barcelona), Pérez-Rodríguez A. (IREC/Univ. de Barcelona), Morante J.R. (IREC/Univ. de Barcelona), Eicke A., Tiwari A.N. (EMPA); **Influence of NaF incorporation during Cu(In,Ga)Se₂ growth on microstructure and photovoltaic performance**; 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, 20–25 June 2010
- / Hanisch J., Ahlswede E.; **Alkali metal interlayer in polymer solar cells**; HOPV 2010, 2nd International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics, Assisi, 23–27 May 2010
- / Hassoun J. (Univ. of Rome), Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Scrosati B. (Univ. of Rome); **Electrochemical behaviour of Sn and Sn-C composite electrodes in LiBOB-containing electrolytes**; 15th International Meeting on Lithium Batteries, Montreal, 27 June–2 July 2010
- / Hauer A. (ZAE), Specht M., Sterner M. (IWES); **Energiespeicher – Steigerung der Energieeffizienz und Integration erneuerbarer Energien**; FVEE-Jahrestagung „Forschung für das Zeitalter der erneuerbaren Energien“, Berlin, 11.–12.10.2010
- / Haug V., Quintilla A., Klugius I., Ahlswede E.; **Influence of an additional carbon layer at the back contact-absorber interface in Cu(In,Ga)Se₂ thin film solar cells**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010
- / Haußmann J., Krüger P., Arlt T. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Analysis of water accumulations in PEM fuel cell stacks with neutron tomography and current density measurements**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Hempel W., Wischmann W.; **Aging of molybdenum back contact and its influence on CIGS solar cells**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Herrmann W. (TÜV-Rheinland), Zamini S. (Arsenal), Fabero F. (CIEMAT), Betts T. (Loughborough Univ.), van der Borg N. (ECN), Kiefer K. (FhG-ISE), Friesen G. (SUPSI), Muellejans H. (JRC), Mohring H.-D., Vazquez M. (Isotofon), Fraile D. (EPIA); **PV module output power characterisation in test laboratories and in the PV industry – Results of the European performance project**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Huckle R., Kaifel A., Felder M.; **Tropospheric ozone from NNORSY-MetOp retrievals**; European Space Agency Living Planet Symposium, Bergen, 28 June–2 July 2010
- / Huckle R., Kaifel A., Felder M.; **IASI and GOME-2: A synergistic one-step ozone profile retrieval using the NNORSY neural network**; EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Cordoba, 20–24 Sept. 2010
- / Jackson P., Lotter E., Hariskos D., Paetel S., Würz R., Menner R., Wischmann W., Powalla M.; **New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells beyond 20%**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010

- / Jagomägi A. (Tallinn Univ.), Möttus E. (Tallinn Univ.), Stellbogen D., Mohring H.-D., Betts T. (Loughborough Univ.), Gottschalg R. (Loughborough Univ.), Zdanowicz T. (WrUT), Kolodenny W. (WrUT), Prorok M. (WrUT), Friesen G. (SUPSI), Pola I. (SUPSI), Dominé D. (SUPSI), Guérin de Montgareuil A. (CEA/INES), Fabero F. (CIEMAT), Faimann D. (Ben Gurion Univ.), Herrmann W. (TÜV-Rheinland); **European network of PV outdoor testing – improvements in the reliability of data analysis**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Jehl Z. (IRDEP), Erfurth F. (IRDEP), Naghavi N. (IRDEP), Lombez L. (IRDEP), Gerard I. (ILV-UMR), Bouttemy M. (ILV-UMR), Tran-Van P. (ILV-UMR), Etcheberry A. (ILV-UMR), Voorwinden G. (WERes), Dimmler B. (WERes), Wischmann W., Powalla M., Guillemoles J.F. (IRDEP-UMR), Lincot D. (IRDEP-UMR); **Influence of the surface roughness on CIGS-based solar cell parameters**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Jossen A., Günther C.; **Wie schnell lassen sich Lithium-Ionen-Batterien laden?**; 1. VDI-Fachkonferenz Elektromobilität, Nürtingen, 17.–18.3.2010
- / Jossen A., Lindenthal H., Späth V.; **Ergebnisse von Lebensdaueruntersuchungen und daraus abgeleitetes Batteriemodell**; 3. Entwicklerforum Akkutechnologien, Aschaffenburg, 13.–15.4.2010
- / Kabza A.; **Automotive fuel cell qualification testing**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Kaifel A., Atkinson N. (UK MetOffice), Huckle R., Felder M.; **Collocation of IASI and GOME-2 measurements on board MetOp-A**; EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Cordoba, 20–24 Sept. 2010
- / Kaifel A., Felder M., Huckle R.; **First results on synergistic ozone profile retrieval from GOME-2 and IASI measurements with NNORSY**; International ATOVS Study Conference, Monterrey, 14–20 April 2010
- / Kaifel A., Felder M., Huckle R., DeClerq C. (BIRA), Lambert J. C. (BIRA); **NNORSY dynamic ozone profile climatology**; European Space Agency Living Planet Symposium, Bergen, 28 June–2 July 2010
- / Kaufmann C. A. (HZB), Caballero R. (HZB), Klenk R. (HZB), Schock H.-W. (HZB), Zajac K. (HTS), Brunner S. (HTS), Rahm A. (Solarion), Scheit C. (Solarion), Zachmann H. (Solarion), Braun A. (Solarion), Otte K. (Solarion), Würz R., Kessler F., Schülke P. (DLR); **Recent results from the German joint project „Flexible CIGSe Thin Film Solar Cells for Space Applications“**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigations on redox shuttle additives for Li-ion batteries**; Ionic Liquids for Electrochemical Devices, Rome, 9–11 June 2010
- / Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Redox shuttle additives for overcharge protection of positive electrodes for Li-ion batteries**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **A combined experimental and theoretical study on tempo and anisole as redox additives for overcharge protection in Li-ion batteries**; Electrochemistry 2010, Bochum, 13–15 Sept. 2010
- / Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **The electrochemical behavior of redox shuttle additives for overcharge protection of Li-ion batteries**; 61st Annual Meeting of the ISE, Nice, 26 Sept.–1 Oct. 2010
- / Kessler F., Hariskos D., Jackson P., Powalla M., Güttler D. (EMPA), Tiwari A.N. (EMPA), Schlessner S. (ASC), Edoff M. (ASC), Skupinski M. (Solibro), Stolt L. (Solibro), Wächter R. (WS), Dimmler B. (WS), Pistor P. (HZB), Abou-Ras D. (HZB), Hesse R. (HZB), Klenk R. (HZB), Schock H.-W. (HZB), Savidand G. (IRDEP), Versavel M. (IRDEP), Naghavi N. (IRDEP), Lincot D. (IRDEP), Perez-Rodriguez A. (Univ. Barcelona), Bermúdez V. (NEXCIS), Grand P.-P. (NEXCIS), Leyder C. (SGR); **Highly productive manufacturing of large-area CIS-based modules**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Klugius I., Gemmel C., Quintilla A., Haug V., Ahlswede E.; **CIS low-cost thin-film solar cells made from elemental metallic nanoparticles: comparison of different selenization parameters**; 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, 20–25 June 2010
- / Krüger P., Haußmann J., Manke I. (HZB), Scholta J.; **Combined neutron tomography of PEM fuel cell stacks and spatially resolved current density measurements**; 7th Symposium on Fuel Cell Modelling and Experimental Validation, Morges, 23–24 March 2010
- / Krüger P., Kuhn R., Arlt T. (HZB), Manke I. (HZB), Hartnig C. (BASF), Scholta J.; **In-situ synchrotron tomography for investigation of water evolution and transport in PEM fuel cells**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Kuhn R., Scholta J., Krüger P., Hartnig C., Lehnert W. (FZJ), Arlt T. (HZB), Manke I. (HZB); **Measuring devices and first results for synchrotron imaging of high temperature PEM fuel cells**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Mack P. (Univ. of Appl. Sc. Ulm), Ott T. (Univ. of Appl. Sc. Ulm), Walter T. (Univ. of Appl. Sc. Ulm), Hariskos D., Schäffler R. (WERes); **Optimization of reliability and metastability of CIGS solar cell parameters**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Memm M.; **Influence of partial Mg substitution on LiMnPO₄ and LiMn_xFe_{1-x}PO₄**; 3rd EUChEMS Chemistry Congress, Nürnberg, 29 Aug. 2010
- / Menner R., Friedlmeier T., Hariskos D., Linß V. (von Ardenne), Powalla M.; **Low-cost reactive sputtering of ZnO:Al from rotatable magnetron for CIGS solar modules**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010

// Veröffentlichungen Publications

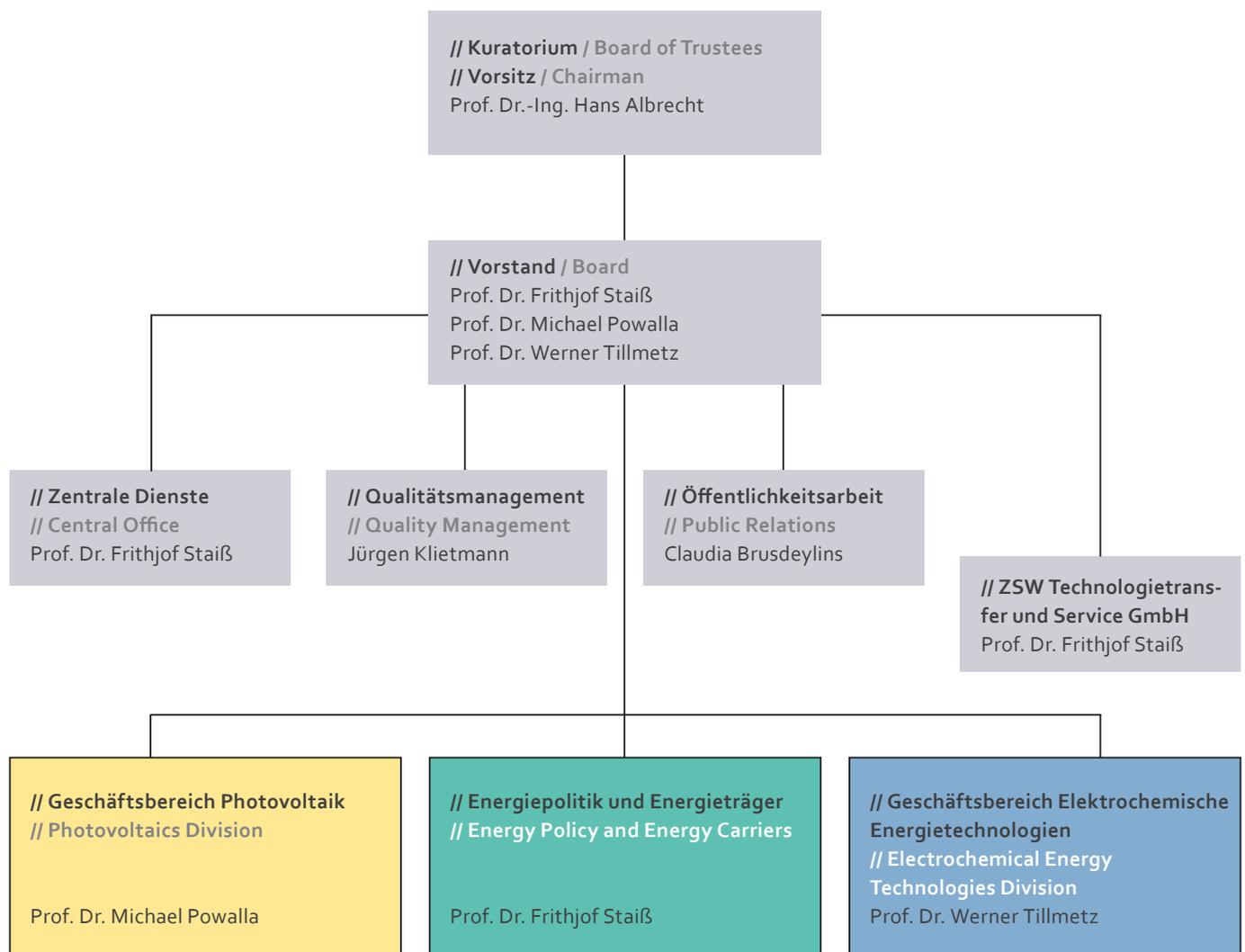
- / Menner R., Hariskos D., Linß V. (von Ardenne), Powalla M.; **Low-cost ZnO:Al transparent contact by reactive rotatable magnetron sputtering for CIGS solar cells**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010
- / Mohring H.-D.; **From module price to generation cost – the scientific point of view**; 3rd EPIA International Thin-Film Conference, München, 9 Nov. 2010
- / Mohring H.-D., Geyer D., Stellbogen D., Schweiger M. (TÜV Rheinland), Jahn U. (TÜV Rheinland), Herrmann W. (TÜV Rheinland); **Neue Testmethoden zur Langzeitstabilität und Charakterisierung von Dünnschichtmodulen**; 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 3.–5.3.2010
- / Mohring H.-D., Stellbogen D., Jagomägi A. (Tallinn Univ.), Möttus E. (Tallinn Univ.), Betts T. (Loughborough Univ.), Gottschalg R. (Loughborough Univ.), Zdanowicz T. (WrUT), Prorok M. (WrUT), Friesen G. (SUPSI-ISAAC), Dominé D. (SUPSI-ISAAC), Guérin de Montgareuil A. (CEA/INES), Fabero F. (CIEMAT), Faiman D. (Ben-Gurion Univ.), Herrmann W. (TÜV Rheinland); **Energy delivery of PV devices – Implementation of best practices for outdoor characterization and testing**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Neumann O. (Univ. Oldenburg), Heidemann F. (Univ. Oldenburg), Heise S.J. (Univ. Oldenburg), Brüggemann R. (Univ. Oldenburg), Witte W., Bauer G.H. (Univ. Oldenburg); **Surface roughness, optical and spectroscopic properties of thin-film systems based on Cu(In,Ga)Se₂ absorbers**; DPG-Frühjahrs-tagung, Regensburg, 21.3.2010
- / Pfanzelt M.; **Lithium-ion batteries for solar applications**; 12th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Pfanzelt M.; **Nanosized rutile – a promising anode material for lithium ion batteries**; 3rd EUChemS Chemistry Congress, Nürnberg, 29 Aug. 2010
- / Powalla M., Friedlmeier T., Jackson P., Hariskos D., Menner R., Mohring H.-D., Wischmann W., Eberhardt J. (WERes), Voorwinden G. (WERes); **In-line co-evaporation of CIGS for manufacturing**; CIGS, Advanced Technologies for Thin-Film CIGS-based Solar Cells - High Technology Information, Tokio Nakada (eds.) CMC Publishing, Tokyo (2010) pp. 106-117
- / Puetz A. (KIT), Reinhard M. (KIT), Nickel F. (KIT), Colsmann A. (KIT), Lemmer U. (KIT), Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E., Powalla M.; **Highly efficient semi-transparent organic solar cells**; LOPE-C, Large-area Organic and Printed Electronics Convention, Frankfurt/M., 31 May–2 June 2010
- / Püttner A., Schmidt M., Staiß F.; **Ökonomische Konsequenzen einer 100 %-Versorgung mit Erneuerbaren bis 2050 für Deutschland**; FVEE-Jahrestagung „Forschung für das Zeitalter der erneuerbaren Energien“, Berlin, 11.–12.10.2010
- / Riedel I. (Univ. Oldenburg), Ohland J. (Univ. Oldenburg), Neerken J. (Univ. Oldenburg), Keller J. (Univ. Oldenburg), Parisi J. (Univ. Oldenburg), Hammer M. (Univ. Würzburg), Kiowski O., Spiering S.; **Photodoping and band offsets in CIGS solar cells with varied buffer layers**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Rogin P. (INM), Yazdani-Assl O. (INM), de Oliveira P.W. (INM), Veith M. (INM), Würz R., Eicke A.; **Sol-gel thin films providing diffusion barrier functionality and electrical insulation for Cu(In,Ga)Se₂ solar cells on steel substrates**; 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, Reims, 19–21 Oct. 2010
- / Scholta J., Messerschmidt M., Jörissen L.; **Design and operation of a 5-kW HT-PEMFC stack for an onboard power supply**; Fuel Cell Seminar 2010, San Antonio, 18–20 Oct. 2010
- / Scholta J., Pawlik J. (Viessmann), Chmielewski N. (Proton Motor Fuel Cell), Jörissen L.; **Longevity test results for reformat PEMFC stacks**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Schott B.; **Lithium – ein begehrter Rohstoff der Zukunft**; 12th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Seidenberger K., Wilhelm F., Scholta J.; **3D Monte Carlo study on water distribution and degradation mechanisms in PEM fuel cell GDLs**; 7th Symposium on Fuel Cell Modelling and Experimental Validation, Morges, 23–24 March 2010
- / Seidenberger K., Wilhelm F., Scholta J.; **Estimation of water distribution and degradation mechanisms in PEMFC GDLs using a 3D Monte Carlo model**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Späth V., Jossen A.; **Simulation elektrochemischer Speicher für Fahrzeuganwendungen**; Workshop der ASIM/GI-Fachgruppen STS und GMMS Simulation technischer Systeme und Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation, Ulm, 4.–5.3.2010
- / Specht M.; **Erneuerbares Methan (EE-Methan) – Überschussstrom aus Wind und PV ins Gasnetz? Stand der Technik**; Bundesverband Biogene und Regenerative Kraft- und Treibstoffe e. V., 6. Green Gas Kongress, Berlin, 9.12.2010
- / Specht M., Baumgart F., Feigl B., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **Biogasaufbereitung mit Wasserstoff – Ein neues Konzept zur Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz / Biogas upgrading with hydrogen – A new concept for storing bio energy and renewable power in the natural gas grid**; Internationale Konferenz des Fraunhofer IWES, Biogasaufbereitung zu Biomethan, Bad Hersfeld, 23.–24.3.2010
- / Specht M., Baumgart F., Feigl B., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz**; Themen 2009 – Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien, FVEE, S. 69, Berlin, 2010
- / Specht M., Brellocks J., Frick V., Steiert S., Stürmer B., Zuberbühler U.; **AER – Technology and SNG from AER gas**; Gasification 2010 – Feedstock, Pretreatment and Bed Material, Gothenburg, 28 Oct. 2010
- / Specht M., Brellocks J., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz**; DGMK-Fachbereichstagung „Konversion von Biomassen“ („Velen IX“), Gelsenkirchen, 10.–12.5.2010



- / Stellbogen D., Mohring H.-D., Jagomägi A. (Tallinn Univ.), Möttus E. (Tallinn Univ.), Friesen G. (SUPSI), Dominé D. (SUPSI), Fabero F. (CIEMAT), Betts T. (Loughborough Univ.), Gottschalg R. (Loughborough Univ.), Zdanowicz T. (WrUT), Prorok M. (WrUT), Herrmann W. (TÜV-Rheinland), Martin J.-L. (CEA/INES), Guérin de Montgareuil A. (CEA/INES), Merten J. (CEA/INES), Faiman D. (Ben Gurion Univ.); **Comparative outdoor characterisation of PV modules across Europe**; 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, 6–10 Sept. 2010
- / Stolwijk N.A. (Univ. Münster), Obeidi Sh. (Univ. Münster), Bastek J. (Univ. Münster), Würz R., Eicke A.; **Iron diffusion in polycrystalline Cu(InGa)Se₂ layers for thin-film solar cells**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010
- / Tran H. Y.; **Ageing mechanism of LiMn₂O₄ spinel / LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ blends for lithium-ion batteries**; GDCh – Electrochemistry, Bochum, 13–15 Sept. 2010
- / Tran H. Y., Täubert C.; **LiMn₂O₄ spinel / LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ blends as cathode materials for Li-ion batteries**; AABC - Advanced Automotive Battery Conference, Orlando, 17–21 May 2010
- / Tran H. Y., Täubert C., Axmann P., Küppers L., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Blends of LiMn₂O₄ spinel and LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ for advanced lithium-ion batteries**; DPG Conference, Regensburg, 21–26 March 2010
- / Tran H. Y., Täubert C., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Study of LiMn₂O₄ spinel / LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ blend electrodes for lithium-ion batteries**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Tran H. Y., Täubert C., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigations of LiMn₂O₄ spinel / LiNi_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂ blend electrodes for advanced lithium-ion batteries**; 15th International Meeting on Lithium Batteries, Montreal, 27 June–2 July 2010
- / Valter V., Jenne M., Edel F., Knaupp H., Jörissen L.; **Modification of a highly integrated methanol-reformer concept for HT-PEM technology**; 12th Ulm ElectroChemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Varzi A.; **CNTs als Leitfähigkeitsadditive für Hochleistungs-Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien**; Inno.CNT Annual Conference, Marl, 19–21 Jan. 2010
- / Varzi A.; **Composite electrodes containing CNTs for lithium ion batteries applications**; ChemOnTubes 2010, Arcachon, 11–15 April 2010
- / Varzi A.; **Multi-walled carbon nanotubes for energy storage devices**; 12th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 15–17 June 2010
- / Varzi A.; **Carbon nanotubes as conductive agent for lithium-ion-batteries electrodes**; Carbon 2010, Clemson, 11–16 July 2010
- / Varzi A.; **Carbon nanotubes as conductive agent for lithium-ion-batteries electrodes**; GDCh - Electrochemistry, Bochum, 13–15 Sept. 2010
- / Varzi A., Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M., Kreis M. (Future Carbon), Schütz W. (Future Carbon); **Study of carbon nanotubes for lithium-ion batteries application**; CIMTEC 2010 – 5th Forum on New Materials, Montecatini Terme, 13–18 June 2010
- / Wachtler M., Ströbele S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Study on film formation on anode materials in LiBOB-based electrolytes for Li-ion batteries**; Electrochemistry 2010, Bochum, 13–15 Sept. 2010
- / Wachtler M., Ströbele S., Wohlfahrt-Mehrens M., Wietelmann U. (Chemetall); **Electrochemical investigation of the filming process of anode materials in LiBOB-based electrolytes**; 5th International Meeting on Lithium Batteries, Montreal, 27 June–2 July 2010
- / Witte W., Hariskos D., Powalla M.; **Comparison of charge distributions in CIGS thin-film solar cells with ZnS/(Zn,Mg)O and CdS/i-ZnO buffers**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **From LiFePO₄ to higher voltage lithium metal phosphates**; IBA-PPSS-Meeting, Waikaloa, 11–15 Jan. 2010
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **New materials for energy storage systems**; DPG Conference, Regensburg, 21–26 March 2010
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **Influence of partial substitution on the electrochemical performance of LiMnPO₄**; 15th International Meeting on Lithium Batteries IMLB, 27 June–2 July 2010
- / Würz R., Eicke A., Kessler F., Rogin P. (INM), Yazdani-Assl O. (INM); **Alternative sodium sources for CIGS thin-film solar cells on flexible substrates**; E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, 7–11 June 2010
- / Zajac K. (HTS), Brunner S. (HTS), Kaufmann C. (HZB), Caballero R. (HZB), Schock H.-W. (HZB), Rahm A. (Solarion), Scheit C. (Solarion), Zachmann H. (Solarion), Kessler F., Würz R., Schülke, P. (DLR); **Latest results of the German joint project "Flexible CIGSe Thin Film Solar Cells for Space Applications"**; 35th Photovoltaics Specialists Conference PVSC 2010, Honolulu, 20–25 June 2010

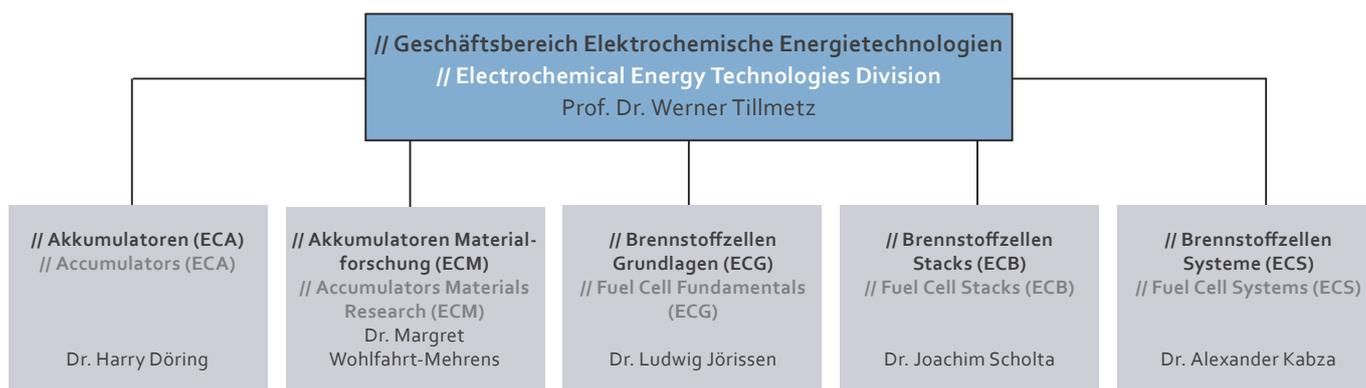
// Organigramme Organisational Charts

// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart





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



// Standorte Locations



// Stuttgart



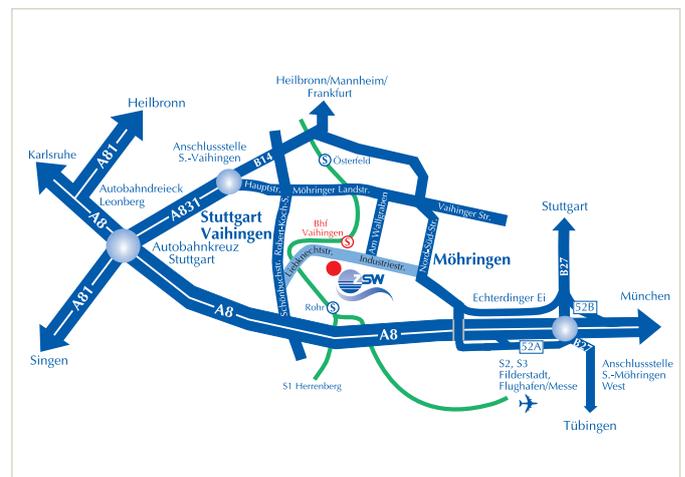
Industriestraße 6
70565 Stuttgart

Ansprechpartner / Contact

Claudia Brusdeylins

Phone: +49 (0) 711 78 70-278

E-Mail: claudia.brusdeylins@zsw-bw.de





// Widderstall



Widderstall 14
89188 Merklingen

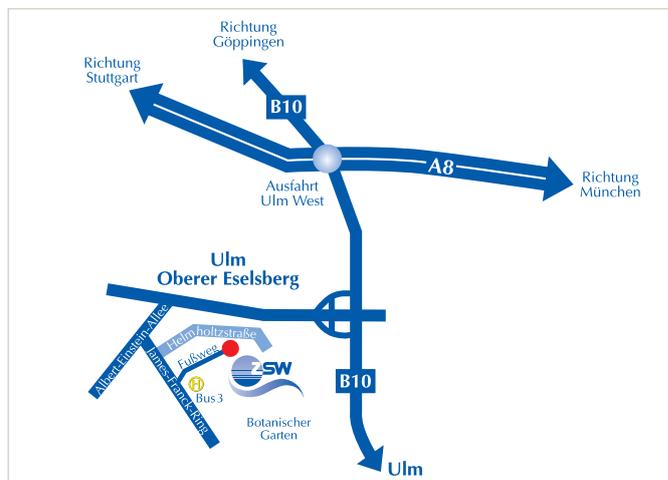
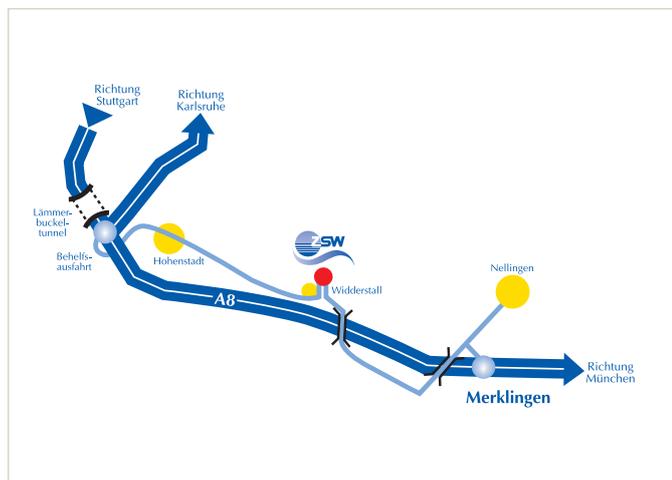
Ansprechpartner / Contact
Olaf Schanz
Phone: +49(0)7337 92 394-0
E-Mail: olaf.schanz@zsw-bw.de

// Ulm



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

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



// Abkürzungen

Abbreviations

// Firmen, Institute, Institutionen

// Companies, Institutes, Institutions

AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
AIST	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
ASC	Angström Solar Center
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung
BBA-BW	Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
BIRA	Belgian Institute for Space Aeronomy
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
CRIC	Centre de Recerca i Investigació de Catalunya
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
FEP	Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik
FhG-ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
FVEE	ForschungsVerbund Erneuerbare Energien
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
GWS	Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IBA	International Battery Association
IBP	Fraunhofer-Institut für Bauphysik
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILV	Institut Lavoisier de Verdun
INES	Institut National de l'Énergie Solaire
INM	Leibniz-Institut für Neue Materialien
IPHE	International Partnership for the Hydrogen Economy
IRDEP	Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque
IREC	Institut de Recerca en Energia de Catalunya/Catalonia Institute for Energy Research
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISI	Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
IZES	Institut für Zukunfts-Energiesysteme
JRC	Joint Research Center

KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LPN	Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, CNRS
MPIE	Max-Planck-Institut für Eisenforschung
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen-technologie
NREL	National Renewable Energy Laboratory
SGR	Saint Gobain Recherche
SUPSI	Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana
SUPSI-ISAAC	Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana – Istituto Sostenibilità Applicata Ambiente Costruito
TUM	Technische Universität München
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WERes	Würth Elektronik Research GmbH
WrUT	Politechnika Wroclawska
WS	Würth Solar
ZAE	Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung

// Technische Begriffe

// Technical Terms

AER	Absorption-Enhanced Reforming
ATOVS	Advanced TIROS Operational Vertical Sounder
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
CNT	Carbon Nanotube/Kohlenstoffnanoröhre
ECV	Essential Climate Variable
GDL	Gas Diffusion Layer
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
HT-PEM	Hochtemperatur-Polymermembran
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
NNORSY	Neural Network Ozone Retrieval System
PEDOT	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)
PEM	Polymermembran
PEMFC	Polymermembran-Brennstoffzelle
PV	Photovoltaik
SIMS	Secondary Ion Mass Spectrometer/Sekundärionen-Massenspektrometer
SNM	Substitute Natural Gas/Erdgasersatz
SNMS	Neutralteilchen-Massenspektroskopie
UV/VIS	Sichtbare Ultraviolett-Strahlung

// 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

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

