

// ERGEBNISSE
RESULTS

2011

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Stiftung / Foundation
5	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
6	Erfolge 2011 / Achievements 2011
12	Schwerpunktbericht 2011: Elektrizität aus Sonnenlicht: Photovoltaik Focus Report 2011: Electricity from Sunlight: Photovoltaics
28	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
30	Systemanalyse / Systems Analysis
34	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
40	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
42	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
46	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
50	Akkumulatoren / Accumulators
54	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
56	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
60	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
62	Organisation und Verwaltung / Organisation and Administration
63	Werkstätten, IT und Bauleitung / Workshops, IT and Construction Management
64	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
72	Dokumentation / Documentation
74	Haushaltsentwicklung / Budget Development
76	Personalentwicklung / Staff Development
78	Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
84	Organigramme / Organisational Charts
86	Standorte / Locations
88	Abkürzungen / Abbreviations
89	Impressum / Imprint

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

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



//Vorwort Foreword

Mit den Beschlüssen vom Sommer 2011 hat die Bundesregierung einen Prozess eingeleitet, der als „Germany's Energiewende“ bereits Eingang in den englischen Sprachschatz findet. Im Fokus steht die Transformation der Stromversorgung, denn in dem Maße, wie erneuerbare Energien zentrale Bedeutung erlangen, muss das Gesamtsystem neu optimiert werden – von der Netzinfrastruktur über die Speicherung und das Erzeugungs- und Nachfragemanagement bis hin zur Kopplung mit neuen Anwendungsfeldern wie der Elektromobilität. Diese große Herausforderung bietet gleichzeitig enorme Chancen für Innovationen. Als so genannter „First mover“ kann Deutschland Lösungen entwickeln, die künftig weltweit gebraucht werden.

Das ZSW ist in zentralen Themenfeldern sehr gut positioniert, in beratender Funktion zur Energiewende und vor allem durch die Technologieentwicklung mit dem Blick für den Markt. Der Themenschwerpunkt des Jahresberichtes zeigt unseren Beitrag zur weiteren Kostenreduktion der Photovoltaik. Weitere Themen sind die Speicherung von Strom nach dem vom ZSW maßgeblich entwickelten „Power-to-Gas“-Konzept und die Arbeiten zur Elektromobilität. Das Highlight 2011 war hier die Fertigstellung des neuen Institutsgebäudes eLaB, mit dem eine einzigartige Infrastruktur zur Herstellung und Weiterentwicklung von kompletten Lithium-Ionen-Zellen und für Batterietests geschaffen wurde.

Wir freuen uns über das hohe Interesse an unseren Themen. Im Jahr 2011 konnten wir als Gäste des ZSW zahlreiche Repräsentanten aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft begrüßen. Eine besondere Ehre war für uns der Besuch des türkischen Staatspräsidenten Abdullah Gül in Begleitung des baden-württembergischen Ministerpräsidenten Winfried Kretschmann.

Für die Erweiterung des Instituts haben wir von vielen Seiten nachhaltige Unterstützung erfahren. Unser Dank gilt deshalb 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 dem Kuratorium mit seinem Vorsitzenden, Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht. Dabei vergessen wir nicht die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ZSW, deren Engagement entscheidend für unseren Erfolg in dieser außerordentlich dynamischen Entwicklungsphase ist.

With the resolutions from the summer of 2011, the German Federal Government has initiated a process known as “Germany's Energiewende”, a phrase that has already found its way into the English language. The focus is placed on the transformation of power supply because, to the same extent that renewable energy is gaining central importance, the complete system must be re-optimised – from grid infrastructure, storage, generation and demand management up to the linkage of these with new application areas such as electromobility. This huge challenge also offers tremendous opportunities for innovation. As a so-called first mover Germany can start developing solutions that will be required worldwide in the future.

The ZSW are well-positioned in key areas. We act in an advisory capacity regarding the transformation of the energy system and especially due to our activities in the research and development of technologies with an eye for the market. The annual report focusses on our contribution to the further cost reduction of photovoltaics. Other topics include the storage of electricity according to the “Power-to-Gas” concept, essentially developed by ZSW, and work on electromobility. The highlight of 2011 was the completion of the new institute building, eLaB, which created a unique infrastructure for the manufacture and further development of complete lithium-ion cells and for battery tests.

We appreciate the strong interest in our topics. In 2011, we welcomed numerous representatives from politics, industry and science as guests of ZSW. The visit of Turkish President Abdullah Gül, accompanied by Winfried Kretschmann, Minister President of Baden-Württemberg, was a special honour for us.

We have received lasting support from many sides for the expansion of the institute. We would like to thank the Federal State of Baden-Württemberg, the German Federal Ministries for the Environment, Research, Transport and Economic Affairs, the European Union, our partners from companies and scientific institutions as well as the members of the Board of Trustees and their Chair, Professor Hans Albrecht. In particular, we would like to extend our special thanks to all members of staff at ZSW whose dedication was crucial to our success during this extraordinarily dynamic phase of development.

// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Prof. Dr. Michael Powalla

// Prof. Dr. Frithjof Staiß



// 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 16 March 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 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
- > Ministerialdirigent Karl Greißing, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg
- > Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft, 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, Karlsruher Institut für Technologie
- > 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

The background of the slide is a close-up photograph of water ripples. The ripples are concentric and spread out from a central point, creating a dynamic pattern of light and dark blue. The colors range from a pale, almost white light blue to a deep, vibrant blue. The texture of the water is visible, with the peaks and valleys of the ripples catching the light.

// Erfolge 2011
Achievements 2011

// Erfolge 2011 Achievements 2011

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung deutlich zu erhöhen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch die Entwicklung neuer und verbesserter Energietechnologien und den Transfer in den Markt. So wurden auch 2011 wieder herausragende Ergebnisse in allen Themenschwerpunkten erzielt.

Das Kapitel „Erfolge 2011“ zeigt die Highlights 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 developing new and improved energy technologies and transferring them to the market. Excellent results were achieved in 2011, again, in all core topic areas.

The section Achievements 2011 shows the highlights in a compact form.

// Frithjof Staiß in die Ennekiekommission der Bundesregierung berufen

Im Herbst hat die Bundesregierung einen Monitoringprozess für die im Juni 2011 beschlossene Energiewende begonnen. Diese soll durch eine vierköpfige Kommission überwacht werden, in die Prof. Frithjof Staiß, geschäftsführender Vorstand des ZSW, als unabhängiger Experte berufen wurde. Die Kommission wird zu den von Bundesumwelt- und Bundeswirtschaftsministerium jährlich zu erstellenden Monitoringberichten sowie zu den alle drei Jahre zu erstellenden Fortschrittsberichten Stellung nehmen und den Fortschritt an den Zielen der Bundesregierung messen. In Verbindung mit unseren Arbeiten zur Ausgestaltung der künftigen Energieversorgung und der von uns geführten Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) übernimmt das ZSW somit bei der Energiewende und ihrem Monitoring eine zentrale Rolle.

// Frithjof Staiß appointed to the German government’s Energy Commission

During the autumn, the German Federal Government launched a monitoring process for the “transformation of the energy system” (Energiewende) implemented by the government in June 2011. This transformation shall be monitored by a four-member commission to which Prof. Frithjof Staiß, Managing Director of ZSW, has been appointed as an independent expert. The Commission will examine the monitoring reports to be produced annually by the German Federal Ministries of the Environment and Economics as well as the progress reports that are to be produced every three years and compare progress with the goals of the German government. In combination with our work in organising and designing future energy supply and the Working Group on Renewable Energies – Statistics (AGEE-Stat) led by us, the ZSW is, in this way, taking a central role in the energy turnaround and monitoring this.



// Vorsitzender der Ennekiekommission der Bundesregierung Prof. Andreas Löschel, Prof. Frithjof Staiß, Prof. Georg Erdmann, Dr. Hans-Joachim Ziesing (v.l.n.r.).
// Chairman of the German government’s Energy Commission Prof. Andreas Löschel, Prof. Frithjof Staiß, Prof. Georg Erdmann, Dr. Hans-Joachim Ziesing (f.l.t.r.).



// Neubau eLaB – Labor für Batterietechnologie

Das neue „ZSW Labor für Batterietechnologie (eLaB)“ wurde errichtet, um dazu beizutragen, eine starke Batterieindustrie in Deutschland aufzubauen. Seit Sommer 2011 laufen die Forschungsarbeiten. Auf einer Forschungsfläche von über 6.000 m² verfügt das eLaB über ein Technikum für die halbautomatische Fertigung von Wickel- und Pouchzellen und ein Test- und Sicherheitszentrum für Batterien und Batteriesysteme.

Im Technikum können neue Komponenten und Mixturen in industriellen Standardzellen evaluiert werden, ohne laufende Produktionsanlagen der Batteriehersteller zu blockieren. Für Hersteller von Produktionsanlagen besteht die Möglichkeit, mit dem ZSW neue Fertigungstechnologien mit den Herstellern zu entwickeln.

// New building – The Laboratory for Battery Technology (eLaB)

The new “ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB)” has been constructed in order to support the development of a strong battery industry in Germany. The research work has been underway since summer 2011. On a surface of 6,000 m², the eLaB has a technical lab for the semi-automatic production of round and pouch cells and includes a test and safety centre for batteries and battery systems.

New components and mixtures can be evaluated in industrial standard cells in the technical lab without blocking the battery manufacturers’ operational production systems. Manufacturers of production systems are also able to develop new production technologies with ZSW using original materials.

Das Batterietest- und Sicherheitszentrum für Batterien, Zellen und Systeme wurde in enger Abstimmung mit Industriepartnern aufgebaut. Die umfangreiche Infrastruktur bietet Herstellern oder Anwendern von Batterien eine Plattform für unabhängige Tests bezüglich der hohen Sicherheitsanforderungen an Fahrzeugbatterien. In Industrieprojekten werden neue Technologien für Batteriemanagement, Ladezustandsbestimmung, Fehlerdiagnose und Thermalhaushalt entwickelt.

The battery test and safety centre for batteries, cells and systems was developed in close collaboration with industrial partners. The comprehensive infrastructure offers manufacturers and users of batteries a platform for conducting independent tests relating to the high safety requirements for vehicle batteries. In industrial projects, new technologies are developed for battery management, state of charge determination, failure analysis and thermal management.

// Ganzjährig Solarmodule testen: neuer Modulprüfstand in Spanien

Die Freifeld-Testeinrichtungen des ZSW werden stetig ausgebaut. Neue Möglichkeiten, ganzjährig und mit einer 1,5-fachen Einstrahlung gegenüber den Verhältnissen auf dem Testfeld Widderstall auf der Schwäbischen Alb Photovoltaikmodule und Generatoren zu charakterisieren, bietet der neue Prüfstand des ZSW in der Nähe von Barcelona. Ab 2012 stehen hier Modulmessplätze für Untersuchungen im Kundenauftrag zur Verfügung.

// Testing solar modules throughout the year: new module testing facility in Spain

ZSW’s outdoor testing facilities are being continuously expanded. The new test facility near Barcelona offers new opportunities to characterise photovoltaic modules and generators throughout the year and with 1.5 times the irradiance available at the Widderstall solar testing facility. From 2012, model measurement stations will be available for investigations conducted on behalf of customers.



// Stromtankstelle mit eCar-2-Go bei der Einweihungsfeier des eLaB.
// Recharging station with “eCar-2-Go” at the inauguration of the eLaB.



// ZSW-Mitarbeiter bei der Montage der Teststände auf dem neuen „Testfeld Süd“.
// ZSW staff installing test rigs at the new “Test Facility South”.

// Erfolge 2011 Achievements 2011

// 3.500 W/l Leistungsdichte – die neue ZSW-Brennstoffzelle für die automobilen Anwendung

Mit der Erfahrung aus über 20 Jahren Forschung und Entwicklung zu Brennstoffzellen lassen sich viele Eigenschaften konsequent optimieren. Im Jahr 2011 konnte eine Lebensdauer von Brennstoffzellen für die stationäre Anwendung in mehr als 20.000 Stunden demonstriert werden. Für die Fahrzeuganwendung spielen Leistungsdichte und Dynamik die entscheidende Rolle. Durch die Optimierung von Bipolarplatten und Dichtungstechnik, in Verbindung mit fortschrittlichen Elektroden konnte jetzt eine Brennstoffzelle mit einer Leistungsdichte von mehr als 3.500 W je Liter Volumen demonstriert werden. Entscheidend ist dabei, dass die Betriebsbedingungen wie Temperatur, Druck und Stöchiometrie den Anforderungen der Automobilindustrie ebenfalls gerecht werden.

// In einem Rutsch beschichten: flexible Dünnschichtsolarzellen mit über 10% Wirkungsgrad

Dünnschichtsolarzellen können nicht nur auf Glas, sondern auch auf leichten, flexiblen Trägermaterialien zum Einsatz kommen. Das erweitert die Anwendungsfelder enorm. Auf dem Weg zur effizienten Bandbeschichtung von Dünnschichtsolarmodulen aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) auf Kunststoff-Folie hat das ZSW einen wichtigen Erfolg erzielt: Die Forscher können in einer Anlage mit kontinuierlichem Durchlauf bereits die wichtigsten Herstellungsschritte am Stück durchführen. Demnächst wollen sie alle Schritte zusammen umsetzen. Das begünstigt künftig eine wirtschaftlichere Fertigung. Die Solarzellen auf 25 µm dünner Polymerfolie erreichen schon heute deutlich über 10% Wirkungsgrad.

// 3,500 W/l power density – The new ZSW automotive fuel cell stack

ZSW's more than 20 years of combined experience in researching and developing fuel cells has enabled many properties to be rigorously optimised. In 2011, we were able to demonstrate fuel cells for stationary applications with an operating life of more than 20,000 hours. For vehicle applications, the power density and dynamics play a decisive role. By optimising bipolar plates and the sealing technology in combination with innovative electrodes, it has now been possible to demonstrate a fuel cell with a power density in excess of 3,500 W per volume litre. A decisive factor is that the operating conditions such as the temperature, pressure and stoichiometry also meet the requirements of the automotive industry.

// Coated in one fell swoop: Flexible thin-film solar modules with more than 10% efficiency

Thin-film solar cells can be used not just on glass but also on light, flexible substrate materials. This expands their possible application fields enormously. En route to the efficient strip-coating of thin-film solar modules made of copper-indium-gallium diselenide (CIGS) on plastic film, ZSW has achieved an important success: the researchers are already able to carry out the most important production stages in one go in a plant with a continual through-feed. They hope to soon be able to complete all the steps at once, which will make the manufacturing process considerably more efficient. The solar cells on 25-micrometre-thick polymer film already achieve efficiencies considerably above 10%.



// Brennstoffzellenstack für automobilen Anwendungen.
// Automotive fuel cell stack.



// Rolle-zu-Rolle-Anlage zur Beschichtung von flexiblen Substraten.
// Roll-to-roll plant for coating flexible substrates.

// Fortschritte bei organischen Solarzellen

Das ZSW konnte seine Erfahrungen im Bereich der organischen Solarzellen im Rahmen mehrerer Förderprojekte weiter ausbauen und sowohl für Einzelzellen als auch für Tandemsolarzellen Effizienzen über 6% demonstrieren. Damit rücken organische Solarzellen zunehmend in den wirtschaftlich interessanten Bereich als sehr kostengünstige Alternative zu etablierten Technologien vor.

// „Power-to-Gas“ P2G®

In der ersten Jahreshälfte 2011 stellte der Automobilkonzern Audi das neue Konzept „Audi balanced mobility“ vor (Informationen unter www.audi-balanced-mobility.de).

Ein wesentlicher Baustein dieses Konzepts ist eine P2G® (Power-to-Gas)-Anlage in der Größenordnung von 6 MW zur Umwandlung von Ökostromüberschüssen in erneuerbares Erdgas substituiert, das sogenannte „e-gas“. Mit der geplanten Inbetriebnahme im Jahr 2013 wird erstmals die kohlendioxidneutrale Kraftstoffproduktion aus Grünstrom im kommerziellen Maßstab erprobt. Die Power-to-Gas-Technologie wurde am ZSW in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut IWES entwickelt und von der SolarFuel GmbH kommerzialisiert, die auch die Anlage für Audi baut.

Parallel zu diesen Aktivitäten bauen die Projektpartner Fraunhofer IWES, SolarFuel und ZSW seit September 2011 mit finanzieller Unterstützung des Bundesumweltministeriums eine weitere Versuchsanlage mit 250 kW_e Anschlussleistung auf, um die Technologieentwicklung voranzutreiben. Mit der Fertigstellung ist im Laufe des Jahres 2012 zu rechnen. Die Ergebnisse werden auch dem e-gas-Projekt zugute kommen.

// Progress with organic solar cells

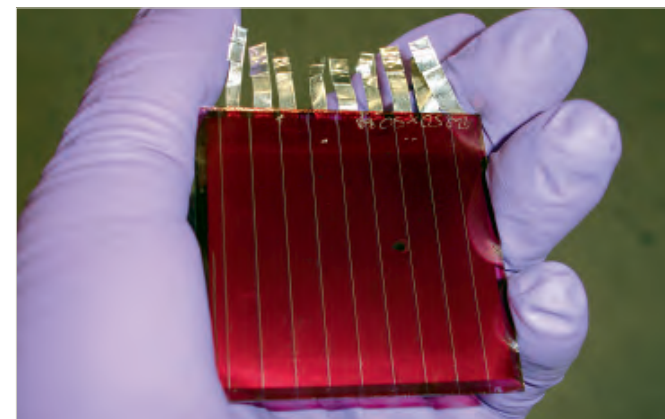
ZSW has been able to further develop its experience in the field of organic solar cells as part of several joint development projects and to demonstrate efficiencies of more than 6% for both individual and tandem solar cells. Organic solar cells are therefore becoming increasingly interesting from a commercial point of view as a highly cost-effective alternative to established technologies.

// „Power-to-Gas“ P2G®

During the first half of 2011, the Audi automotive group presented its new “Audi balanced mobility” concept (information available at www.audi-balanced-mobility.de).

A substantial component of this concept is a P2G® (Power-to-Gas) plant with a size of 6 MW for converting surplus green electricity into renewable natural gas – known as “e-gas”. Scheduled to go into operation in 2013, this will enable the production of carbon dioxide-neutral fuel from green electricity to be tested for the first time on a commercial scale. The Power-to-Gas technology was developed at ZSW in conjunction with the Fraunhofer IWES Institute and has been commercialised by SolarFuel GmbH, which is also constructing the plant for Audi.

Parallel to these activities and in order to drive forward the development of this technology, the project partners, Fraunhofer IWES, SolarFuel and ZSW, have been constructing a second test plant with a connected load of 250 kW_e since September 2011. The plant, which has received financial support from the German Ministry of the Environment (BMU), is scheduled for completion during the course of 2012. The results will also be to the benefit of the e-gas project.



// PV-Modul mit organischem Absorber aus dem ZSW.
// PV module with organic absorber developed by the ZSW.



// Ein Erdgasfahrzeug der Audi AG wird an der 25-kW-„Power-to-Gas“-Anlage betankt.
// A natural gas vehicle by Audi AG being refuelled at the 25-kW “Power-to-Gas” plant.



// Schwerpunktbericht 2011

Focus Report 2011

Elektrizität aus Sonnenlicht: Photovoltaik

Electricity from Sunlight: Photovoltaics

// Schwerpunktbericht 2011

Focus Report 2011

Elektrizität aus Sonnenlicht: Photovoltaik

Electricity from Sunlight: Photovoltaics

// Elektrische Energie aus Sonnenlicht – risikolos und emissionsfrei in der Erzeugung, weltweit uneingeschränkt nutzbar, unerschöpflich und in einem Umfang erzeugbar, der den globalen Energiebedarf um ein Vielfaches übersteigt – eine ideale Energieform?

Die Vorzüge der photovoltaischen Stromerzeugung sind unbestritten. Doch bevor sie weltweit voll genutzt wird und eine entsprechende Rolle in der Energieversorgung übernehmen kann, sind noch einige Herausforderungen zu überwinden. Einerseits sind die Kosten des Solarstroms weiter zu senken, zum anderen besteht die Abhängigkeit vom saisonalen und tageszeitlichen

// Electrical energy from sunlight: generated without risk and emission-free, useable worldwide without limitations, inexhaustible and available to an extent that exceeds the global energy requirements many times – an ideal form of energy?

The advantages of photovoltaic electricity generation are undisputed. However, before it can be fully used throughout the world and take on a corresponding role in the provision of energy, several challenges still have to be overcome. On the one hand, the costs of solar power need to be further reduced, and on the other hand, the dependence on the seasonal and daily course of



// Netzunabhängige Dorfstromanlage mit Photovoltaik.
// Off-grid photovoltaic system in a mountain village.

Gang der Sonne und den jeweiligen Witterungsbedingungen, so dass Solarstromangebot und Stromnachfrage häufig nicht übereinstimmen. Hierfür Lösungen zu entwickeln ist eine zentrale Forschungsaufgabe des ZSW.

// Die Anwendungen der Photovoltaik (PV)

Wo Stromnetze nicht zur Verfügung stehen, ist die PV oft die einzige Möglichkeit für die Versorgung mit elektrischem Strom. Ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt, ist sie in netzfernen Anwendungen längst unverzichtbar geworden: Die Stromversorgung von Millionen Telekommunikationseinrichtungen, Verkehrszeichen auf See und an Land, Umweltüberwachungsanlagen, Straßenleuchten oder Ferienhäusern und Berghütten ist heute bereits ein Markt im Milliarden-Euro-Bereich. Auch für die Elektrifizierung in Entwicklungsländern spielt die Photovoltaik eine wichtige Rolle. Unter den Rahmenbedingungen dieser Märkte ist die solare Stromerzeugung konkurrenzlos bzw. hoch wettbewerbsfähig gegenüber Alternativen. Durch die kontinuierliche Kostensenkung wachsen die erschließbaren Märkte für die ländliche Elektrifizierung in Entwicklungs- und Schwellenländern stetig.

Trotz dieses breiten Anwendungsspektrums ist die Bedeutung der PV gemessen am Weltenergiebedarf heute noch relativ gering. Sie wird energiewirtschaftlich nur dann zu einer bedeutenden Größe werden, wenn sie sich auch im netzgekoppelten Betrieb gegenüber anderen Energieträgern durchsetzt. Deutschland gilt hier weltweit als Vorreiter. Im Bestreben von Gesellschaft und Politik, die Abhängigkeit von Energieimporten zu verringern und einen klimafreundlichen Ersatz der fossilen Stromerzeugung ohne die Risiken der Kernenergie voranzubringen, wurde bereits 1990 das Stromeinspeisegesetz zur Förderung der Stromerzeugung aus regenerativen Energien beschlossen. Es wurde durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 abgelöst, mit dem eine stärker an den Kosten der jeweiligen Technologien orientierte Einspeisevergütung eingeführt wurde.

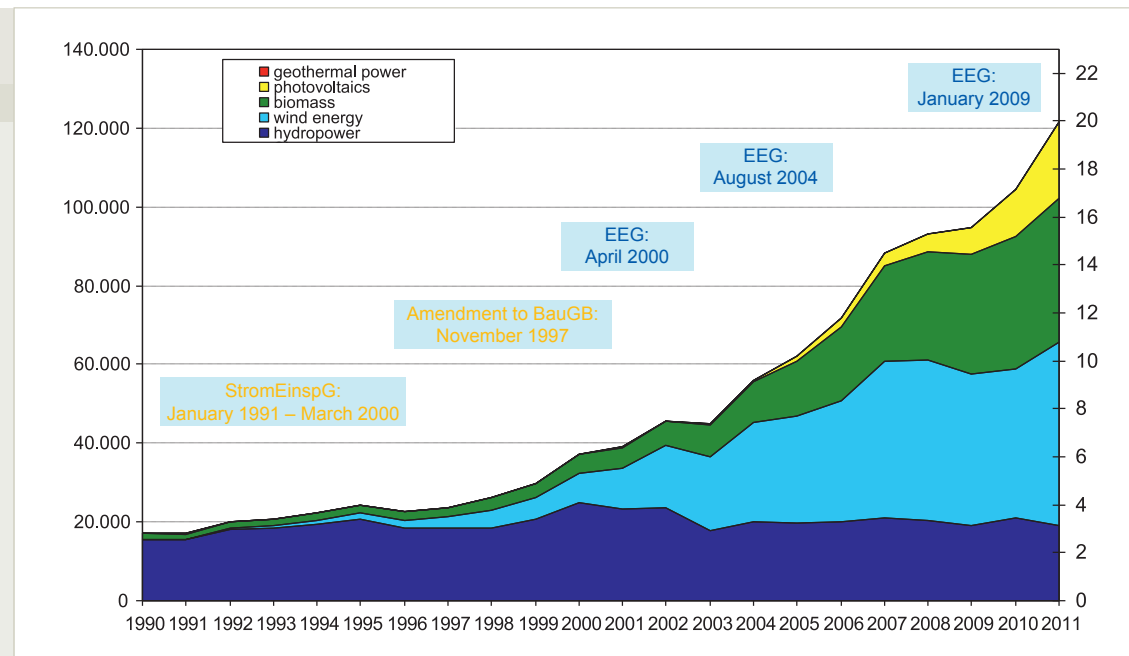
the sun and the respective weather conditions means that solar power supplies and demands frequently do not match. Developing solutions for this is one of ZSW's main research tasks.

// The application of photovoltaics (PV)

Where electricity grids are not available, PV often provides the only possibility for supplying electrical power. Originally developed for use in outer space, it has long become indispensable for off-grid applications. The provision of electricity for millions of telecommunications facilities, transport signs at sea and on land, environmental monitoring systems, street lamps, holiday homes and mountain chalets is already a multi-billion euro market. PV also plays an important role for providing electrification in developing countries. Given the underlying conditions in these markets, solar power generation is unrivalled or at least highly competitive when compared with the alternatives. As a result of the continual cost reductions, the potential markets for rural electrification in developing and emerging countries are growing constantly.

Despite this wide range of applications, the importance of PV is still relatively small when measured against the worldwide energy requirements. It will only become a significant force in the energy industry if it can also successfully compete against other energy sources in on-grid operation. Germany is considered to be a pioneer here. As part of the social and political efforts to reduce the dependence on energy imports and to drive forward the climate-friendly replacement of fossil power supplies without relying on risky nuclear energy, the Electricity Feed-in Act for Promoting the Generation of Electricity from Renewable Energies was passed in 1990. In the year 2000, it was replaced by the Renewable Energy Sources Act (EEG), which introduced a feed-in tariff that much more closely reflected the costs of the respective technologies.

// Abb. 1: Innerhalb von zwei Jahrzehnten hat sich der Beitrag erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung in Deutschland verfünffacht.
 // Fig. 1: Within two decades, the contribution made by renewables to electricity generation in Germany has increased fivefold.



Quelle: AGEE-Stat. StromEinspG = Stromeinspeisegesetz, BauGB = Baugesetzbuch, EEG = Erneuerbare-Energien-Gesetz.
 Source: AGEE-Stat. StromEinspG = Electricity Feed-in Act, BauGB = Federal Building Code, EEG = Renewable Energy Sources Act.

Wie Abb. 1 zeigt, führte die dadurch ausgelöste Wachstumsdynamik in Deutschland zu einem Anstieg des regenerativen Anteils der Stromerzeugung von 6,4 % auf 20 % im Jahr 2011. Mit dem EEG begann auch für den Einsatz der netzgekoppelten PV ein neues Zeitalter: Indem der Gesetzgeber eine kostendeckende Vergütung etablierte, wurde es ökonomisch interessant, PV-Strom vom Hausdach ins öffentliche Netz einzuspeisen. Inzwischen sind in Deutschland rund eine Million PV-Anlagen mit einer Leistung von 25.000 MW installiert, die 3,1 % zur gesamten Stromversorgung beitragen. Der deutsche Ansatz der Einspeisevergütung dient mehr als 50 anderen Ländern und Regionen als Vorbild. Weltweit waren im Jahr 2011 PV-Anlagen mit einer Nennleistung von rund 60.000 MW installiert. Der Strom aus diesen Anlagen entspricht der jährlichen Energiebereitstellung von acht großen Kernkraftwerksblöcken.

// Historische Preisentwicklungen

Die PV hat den Laborstatus sehr viel schneller verlassen als erwartet und entwickelt sich stetig zu einer energiewirtschaftlich ernst zu nehmenden Größe. In sehr kurzer Zeit ist ein neuer Industriezweig entstanden, der 2011 bereits 50 Mrd. € erwirtschaftet hat. Dabei wurden von der Rohstoffaufbereitung bis zur Anlageninstallation Hunderttausende Arbeitsplätze neu geschaffen. Diese beachtlichen Erfolge sind jedoch nur ein erster Schritt. Das Ziel ist die wettbewerbsfähige Stromerzeugung aus PV ohne jegliche Förderung. Die hierfür notwendige Kostensenkung konnte in der jüngsten Vergangenheit mit Erfolg vorangetrieben werden.

Die Kosten bzw. Preise von PV-Anlagen setzen sich zusammen aus den Kosten des PV-Moduls (der Stromerzeugungseinheit und damit Kernkomponente), den Kosten der weiteren Systemkomponenten wie Wechselrichter, Montagegestell und Verkabelung sowie den Kosten für die Planung und Montage der Anlagen. Abb. 2 zeigt die Preisentwicklung von PV-Modulen. Während zwischen 1976 und 1999 der Modulpreis stetig von 65 US\$ bzw. 50 €

As Fig. 1 shows, the growth dynamic that was triggered in Germany led to an increase in the renewable share of electricity generation from 6.4% to 20% in 2011. With the EEG, the use of on-grid PV also entered a new era: because the government introduced cost-covering remuneration, it became economically interesting to feed PV power from house roofs into the public grid. Around one million PV systems with a total output of 25,000 MW are now installed in Germany, which contribute to 3.1% of the overall electricity provision. The German use of feed-in tariffs has provided a model for more than 50 other countries and regions. In 2011, PV systems with a total rated output of around 60,000 MW were installed worldwide. The electricity from these systems corresponds to the energy provided annually by eight large-scale nuclear power stations.

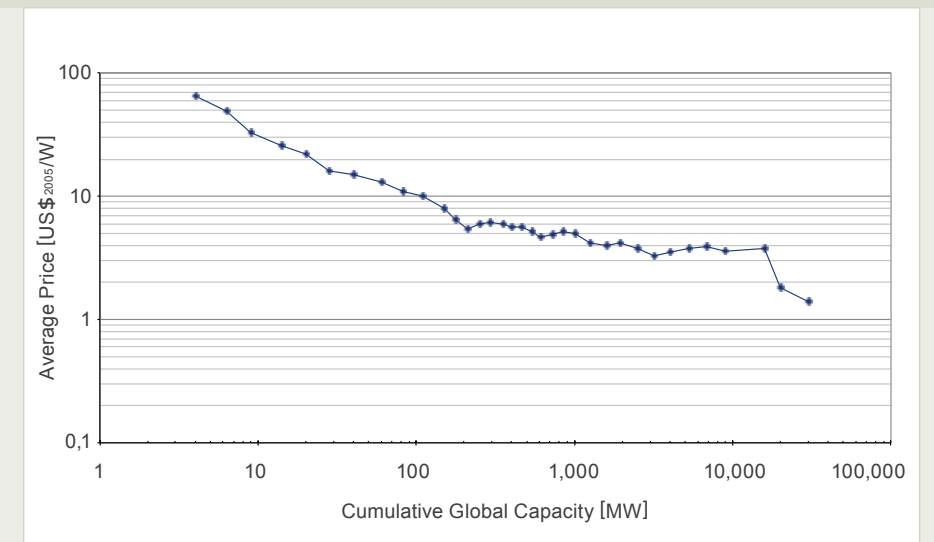
// Historic price development

PV has left the laboratory status much more quickly than was expected and is increasingly growing into an economic force to be reckoned with in the energy industry. A new industrial sector has been created within a very short space of time that already generated a turnover of 50 billion euros in 2011. Hundreds of thousands of new jobs have been created, ranging from the raw material processing to the installation of PV systems. However, these notable successes are only the first step. The aim is to generate competitive electricity from PV that does not rely on subsidies. The necessary reduction in costs has already been successfully driven forward in the recent past.

The costs of PV systems relate to the costs of the PV modules used (the electricity generating units and thus the core components), the costs of other system components such as the inverter, mounting frame and cabling, as well as the costs for planning and installing the systems. Fig. 2 shows the price development of PV modules. Although module prices dropped steadily between 1976 and 1999 from US\$65 or €50 per rated watt to US\$4 or €3 per

// Focus

// Abb. 2: Historische Preisentwicklung: von 1976 bis 2010 hat sich der Preis von PV-Modulen aus kristallinem Silizium je Watt Nennleistung von 65 US\$ auf 1,4 US\$ reduziert. In der Darstellung (doppeltlogarithmische Lernkurve) ist der Preis inflationsbereinigt über dem kumulierten Produktionsvolumen aufgetragen.
 // Fig. 2: Historic price development: From 1976 to 2010, the cost of PV modules made from crystalline silicon has reduced from US\$65 to US\$1.4 per rated watt. In the graph (double logarithmic learning curve), the inflation-adjusted price is plotted relative to the cumulated production volume.



Quelle/Source: Arvizu, D. et al., 2011: Direct Solar Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer et al. (eds)], Cambridge University Press. Fig. 3.17.

je Watt Nennkapazität auf 4 US\$ bzw. 3 € pro Watt gefallen ist, blieb der Preis in den Folgejahren zunächst trotz einer Verzehnfachung des Produktionsvolumens nahezu stabil bei 4 US\$ pro Watt (3 € pro Watt). Hauptgrund hierfür war die durch die attraktiven gesetzlich garantierten Einspeisevergütungen ausgelöste große Nachfrage nach PV-Systemen.

Dies änderte sich Ende 2008, als die weitere Entwicklung des damals weltweit größten Einzelmarktes Spanien (Absatz 2008: 2.600 MW) durch die Einführung einer absoluten Zubaubeschränkung in Höhe von 500 MW politisch massiv beschnitten wurde. Ein Nachfrageeinbruch war die Folge. Auf der Angebotsseite kam die Überwindung der Siliziumknappheit hinzu, wodurch diese Rohstoffkomponente in erheblich größerer Menge zu deutlich geringeren Preisen verfügbar war. Insbesondere nahmen aber immense neue Fertigungskapazitäten im asiatischen Raum die Produktion auf. Somit stand Anfang 2009 ein sehr großes Modulangebot einer vergleichsweise geringen Nachfrage gegenüber.

Auch in Deutschland führte die Neufassung des EEG 2009 zu einer deutlichen Absenkung der Vergütungssätze, sodass sich zunächst kaum Käufer fanden. Es folgte der in Abb. 2 gezeigte Sturz der Modulpreise auf 1,4 US\$ pro Watt bzw. 1,08 € pro Watt. Dieser Trend setzte sich auch im Jahr 2011 fort. Aktuell spiegelt diese Preisentwicklung jedoch möglicherweise die Kostensituation der Hersteller nicht mehr wider: Die Preissenkungen basieren nicht mehr auf der Realisierung von Kostenreduktionen in der Produktion, sondern sind allein dem großen Überangebot im Markt geschuldet. Für einzelne Hersteller kann dies bedeuten, dass sie gezwungen sind, unter ihren Produktionskosten zu verkaufen.

Wie Abb. 3 auf der nächsten Seite zeigt, wirken sich die deutlich reduzierten Modulpreise auch auf Gesamtsysteme aus. So ist der durchschnittliche Preis für ein installiertes PV-System mit einer Nennleistung bis 100 kW seit Anfang 2009 um 47 % gesunken, gegenüber 2006 sogar um 58 %.

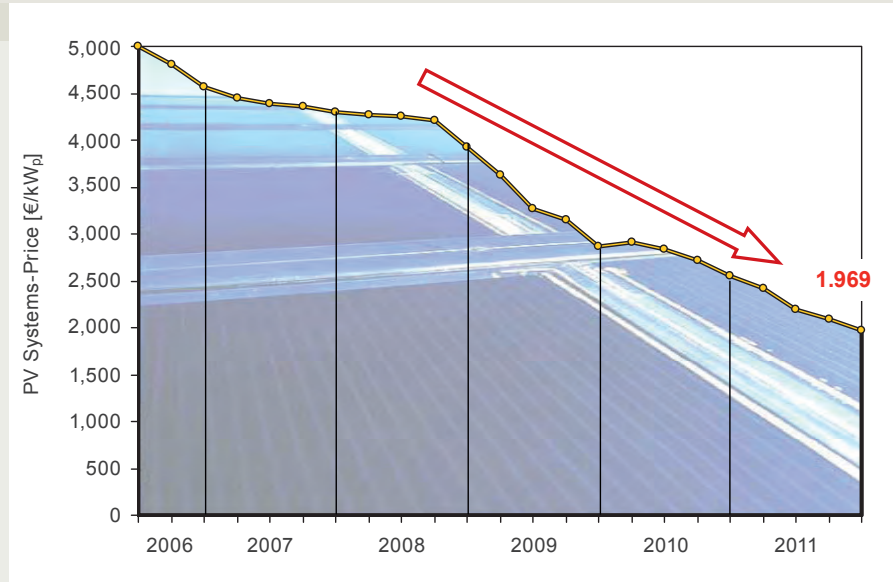
watt, during the subsequent years the prices initially remained almost stable at US\$4 per watt (€3 per watt) despite the tenfold increase in production volume. The main reason for this was the enormous demand for PV systems triggered by the attractive, statutory guaranteed feed-in tariffs.

That changed at the end of 2008 when the further expansion of what was then the world's largest single market in Spain (turnover 2008: 2,600 MW) was vastly curtailed when the government introduced an absolute annual cap on new installations amounting to 500 MW. This led to a slump in demand. On the supply side, however, the silicon shortage was overcome, which meant that this raw material component was available in considerably larger volumes at vastly lower prices. Moreover, new manufacturing capacities in the Asian region began production on a huge scale. At the beginning of 2009, the supply of modules therefore vastly outstripped the relatively small demand.

In Germany, the amendment to the EEG Act in 2009 also led to a considerable reduction in the remuneration rates, which meant that at first, it was difficult to find buyers. This in turn led to a collapse in the module prices to US\$1.4 per watt or €1.08 per watt as shown in Fig. 2. This trend also continued in 2011. However, this price development possibly no longer reflects the current cost situation of the manufacturers, since the price reductions are no longer based on the realisation of cost reductions in production but are purely a consequence of the considerable oversupply in the market. For some manufacturers, this could mean that they are forced to sell at prices lower than their production costs.

As Fig. 3 on the next page shows, the considerably reduced module prices also have an impact on the overall systems. For example, the average price for an installed PV system with a rated output of up to 100 kW has dropped by 47% since the beginning of 2009, and even by 58% relative to 2006.

// Abb. 3: Historische Preisentwicklung: der Systempreis in Deutschland installierter PV-Systeme je Kilowatt installierter Leistung.
// Fig. 3: Historic price development: the price for PV systems installed in Germany per kilowatt of installed capacity.



Quelle: Unabhängige repräsentative Befragung von 100 Installateuren durch EUPD-Research im Auftrag des BSW-Solar.
Source: Independent representative survey of 100 installers by EuPD Research on behalf of BSW-Solar.

Entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit von Solarstrom sind jedoch nicht die Anlagen-, sondern die Stromgestehungskosten. Hier fließen die Leistungsfähigkeit der Anlagen (Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Lebensdauer usw.), Wartungskosten, die Sonneneinstrahlung am Standort und die finanzmathematischen Randbedingungen einschließlich der Renditeerwartung der Investoren ein. Für Deutschland kann hierfür die meist kostendeckende Einspeisevergütung nach dem EEG als Indikator herangezogen werden, selbst wenn sie kurzfristige Preisschwankungen am Markt nicht widerspiegelt. Wie Abb. 4 exemplarisch zeigt, haben sich die Vergütungssätze und damit in der Tendenz die Kosten von Solarstrom in Deutschland innerhalb von nur fünf Jahren ungefähr halbiert und liegen bei den Hausdachanlagen bereits auf dem Niveau der Stromtarife privater Haushalte.

Diese Entwicklung war nur durch erhebliche Kostensenkungen in der gesamten Prozesskette der Herstellung möglich. In der rasant wachsenden Industrie vollzogen unter hohem Wettbewerbsdruck sowohl die Produzenten als auch die Zulieferindustrie schnelle Technologieentwicklungen. Hierzu zählen insbesondere die Weiterentwicklung von Produktionsverfahren, teilweise in Verbindung mit einem reduzierten Materialeinsatz, die Verbesserung des „Bauelements Solarzelle“ etwa durch erhöhte Wirkungsgrade sowie der Einsatz neuer Halbleiter, die bei gegebenem Materialeinsatz eine höhere Energieernte ermöglichen. Hinzu kamen Produktstandardisierungen vor allem hinsichtlich der Systemkomponenten Verkabelung, Montagesysteme, Anschlussdosen usw. ebenso wie deutliche technologische Verbesserungen im Bereich der Wechselrichter.

Ohne den Beitrag der Wissenschaft wäre dies allerdings nicht möglich gewesen. Deutschland hat neben der durch das EEG induzierten Nachfrage nach PV-Anlagen gerade auch durch die gezielte Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Rahmen der Forschungsförderung die Entwicklung der PV voran-

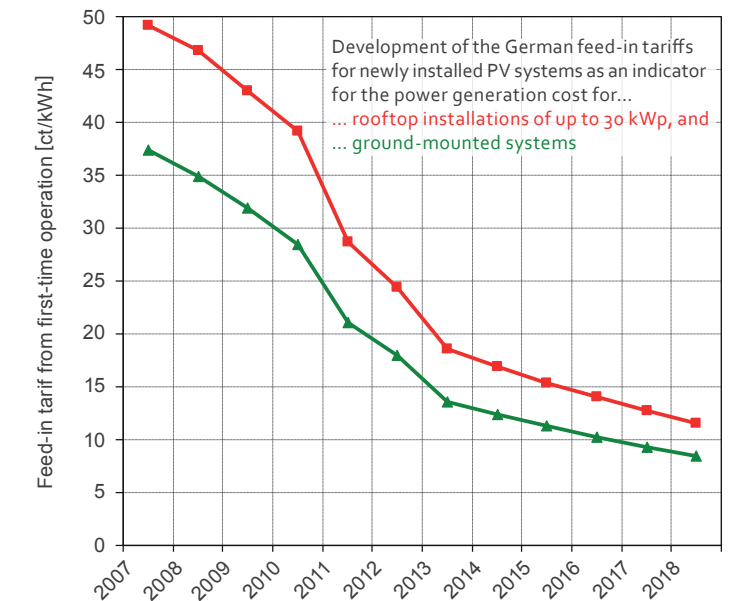
However, it is not the system costs which are decisive for the competitiveness of solar power but the costs of generating electricity. These depend on the system performance (efficiency, reliability, service life and so on), maintenance costs, solar irradiance at the site and the underlying financial and mathematical conditions including the profit expectations of the investors. For Germany, the mostly cost-covering feed-in tariff in accordance with the EEG can be drawn upon as an indicator for this purpose, even if it does not reflect short-term price fluctuations in the market. As Fig. 4 shows by way of example, in Germany the remuneration rates and, as a consequence, the costs for solar power have roughly halved within just five years, whereby rooftop systems are already at the same level as the electricity tariffs for private households.

This development was only made possible as a result of considerable cost reductions throughout the entire process chain. In the rapidly developing industry, both the producers and the supply industry have carried out rapid technology developments in the face of considerable competitive pressure. In particular, these include the further development of production processes in combination with a reduced use of materials, improvements to solar cells, such as increasing the efficiency, as well as the use of new semiconductors that enable increased energy yields to be achieved for the same material consumption. In addition, there have been production standardisations, particularly in terms of the system components, cabling, mounting systems, junction boxes and so on, along with considerable technological improvements in the inverter sector.

However, without the contribution made by science, none of this would have been possible. In addition to the EEG-induced demand for PV systems, Germany has also done much to promote the development of PV through targeted support for research and development projects as part of research funding programmes. Industry-oriented solar research institutes, German manufacturers of solar cells, solar modules and system components and, in particular, the

// Focus

// Abb. 4: Die Einspeisevergütung nach dem EEG als Indikator für die Kostenentwicklung von Solarstrom (Stand 1.1.2012).
// Fig. 4: Feed-in tariff according to the EEG as an indicator for the cost development of solar power (as of 1 January 2012).



gebracht. Die industrienahen Solarforschungsinstitute und die deutschen Hersteller von Solarzellen, Solarmodulen und Systemkomponenten sowie vor allem die deutsche Zulieferindustrie, die schlüsselfertige Produktionsanlagen für Solarzellen in die ganze Welt liefert, konnten sich so eine global führende Position erarbeiten. Diese gilt es auch weiterhin im internationalen Wettbewerb zu verteidigen.

// Die Techniken der Photovoltaik

Im März 1958 starteten die USA ihren zweiten Weltraumsatelliten Vanguard 1, die ehemalige UdSSR im Juni 1958 ihren dritten Satelliten, Sputnik 3. Diese beiden Flugkörper markieren den Beginn des Einsatzes von Solarzellen im Weltraum.

Die Solarzellen beider Satelliten waren aus dünnen Scheiben hochreinen kristallinen Siliziums – Siliziumwafern – hergestellt. Das Silizium wirkt als Absorber. Licht, das auf den Siliziumwafer trifft, wird aufgenommen und setzt im Inneren des Materials negative und positive Ladungsträger frei. Diese werden in einem elektrischen Feld getrennt und fließen zur Vorder- bzw. Rückseite des Wafers. Dort werden sie auf metallischen Sammelkontakten, je einem für die positiven und die negativen Ladungen, zusammengefasst. Die Elemente „Absorber“ (im Absorber entstehendes „elektrisches Feld“) sowie „Front- und Rückseitenkontakte“ finden sich in jeder Solarzelle.

Die Absorber der meisten Solarzellen sind auch heute noch Siliziumwafer, birdeckelgroße Scheiben aus hochreinem, ca. 50 bis 250 µm dickem Silizium. Das elektrische Feld wird durch oberflächliches Einbringen der Fremdatome Bor bzw. Phosphor erzeugt. Die Kontakte aus Silber bzw. Aluminium werden im Siebdruck aufgebracht und anschließend eingebrannt.

Nach dem Prozess der Zellfertigung werden die einzelnen Solarzellen elektrisch miteinander verschaltet und zwischen zwei Glasscheiben bzw. zwischen einer Glasscheibe und einer Rückseitenfolie einlaminiert. So entsteht das „Solarmodul“, in dem die Solarzellen für einen stabilen Betrieb über mindestens 20 Jahre gegen Regen, Hagel und UV-Strahlung geschützt sind. Solarmodule haben typischerweise eine Fläche von 0,7 bis 1,6 m², bei Bedarf werden auch kleinere oder größere Formate gefertigt.

German supply industry, which supplies turnkey production systems for solar cells throughout the world, have all managed to carve out a globally leading position. It is essential that Germany continues to defend this position in the face of international competition.

// Photovoltaic technologies

In March 1958, the USA launched their second space satellite, Vanguard 1, and in June 1958, the former USSR launched their third satellite, Sputnik 3. The two satellites marked the first time that solar cells were used in outer space.

The solar cells from both satellites were produced from thin discs of high-purity crystalline silicon – silicon wafers. The silicon acts as an absorber. Light that is incident on the silicon wafers is captured and releases negative and positive charge carriers within the material. These are separated in an electrical field and flow to the front and rear sides of the respective wafers. There they are collected by metallic bus bars – one for the positive and one for the negative charges. The absorber (or the “electrical field” within the absorber) as well as the “front and rear contacts” can be found in every solar cell.

Most solar cells still use silicon wafers as absorbers today. They come in the form of panes the size of a beer mat, made of high-purity silicon and are roughly 50 to 250 micrometres thick. The electrical field is created by applying foreign boron or phosphorus atoms to the surface. The silver or aluminium contacts are screen-printed on the surface and then fired on.

Once the cells are produced, the individual solar cells are electrically connected to one another and laminated between two glass panes or between a glass pane and a rear film. This therefore creates a “solar module” in which the solar cells are protected against rain, hail and UV radiation for at least 20 years. Solar modules typically have a surface area between 0.7 and 1.6 m², but smaller or larger sizes can be produced if required.

Since solar cells were invented, scientists have experimented with replacing the silicon wafer with other absorber materials, since crystalline silicon has to be relatively thick for physical- and pro-

// Focus

Seit Erfindung der Solarzellen haben Wissenschaftler damit experimentiert, den Siliziumwafer durch andere Absorbermaterialien zu ersetzen, denn kristallines Silizium muss aus physikalischen und fertigungstechnischen Gründen relativ dick sein. 180 µm sind die heutige Standarddicke, 100 µm werden langfristig angestrebt. Damit werden heute 7 kg Silizium für Solarmodule mit einer Nennleistung von 1 kW gebraucht. Wenn es gelänge, Solarzellen mit deutlich dünneren Absorbern herzustellen, wären hohe Kostenersparungen möglich, da die hochreinen Absorbermaterialien teuer sind.

// Dünne Schichten

Drei alternative Absorbermaterialien werden neben kristallinem Silizium für die Herstellung von Solarzellen eingesetzt: amorphes Silizium (a-Si) bzw. eine Kombination aus amorphem und mikrokristallinem Silizium (a-Si/µc-Si), der Verbindungshalbleiter Cadmiumtellurid (CdTe) und ein Verbindungshalbleiter aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen (abgekürzt CIS oder CIGS). Solarzellen aus den genannten drei Materialien heißen Dünnschichtsolarzellen, weil die Absorber jeweils nur wenige Mikrometer stark sind. Nur 0,2 kg der Halbleitermaterialien werden für Module mit einer Leistung von 1 kW als Absorber benötigt. Diese Absorber sind nicht wie Siliziumwafer selbsttragend, sondern sie werden auf Trägern, meist auf Glasscheiben, abgeschieden. Die Abscheideverfahren in Vakuumkammern sind aus der Architekturglasbeschichtung und der Fertigung von Flachbildschirmen bekannt.

Damit unterscheidet sich die Herstellung von Dünnschichtmodulen grundsätzlich von der Wafersilizium-Technologie. Nicht mehr die einzelne Zelle, sondern ein Solarmodul mit schon verschalteten Zellen wird prozessiert: Kontaktflächen, Absorber und weitere Zwischenschichten werden in integrierten Prozessen auf großen Glasscheiben abgeschieden. Abschließend werden die Schichten durch Lamination einer zweiten Glasplatte zum fertigen Solarmodul verbunden (siehe Abb. 5). Alle drei oben genannten Dünnschicht-Techniken sind zu industrieller Reife gelangt. Im Jahr 2010 wurden weltweit PV-Module mit den Absorbern a-Si, CdTe oder CIGS mit einer Gesamtleistung von 2.262 MW produziert, die einen Anteil von 13 % an der gesamten Jahresproduktion von Solarmodulen hatten (siehe Tab. 1).

Die gleichzeitige Existenz von kristalliner Silizium-Wafertechnik und drei Dünnschicht-Techniken im Wettbewerb nach Jahrzehnten der Entwicklung ist bemerkenswert. Sie spricht für das solide technische Konzept jedes dieser Ansätze und stabilisiert damit den Industriesektor als Ganzen. Die mittelfristigen Aussichten der Dünnschicht-Techniken werden von der PV-Industrie im Moment mit Blick auf die technisch-wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit recht positiv eingeschätzt (siehe auch Abb. 6).

duction-related reasons. 180 µm is the current standard thickness, but the aim is to achieve a thickness of 100 µm in the long term. 7 kg of silicon is currently required for solar modules with a rated output of 1 kW. If solar cells can be manufactured with considerably thinner absorbers, this would enable considerable cost savings to be made, since high-purity absorber materials are expensive.

// Thin films

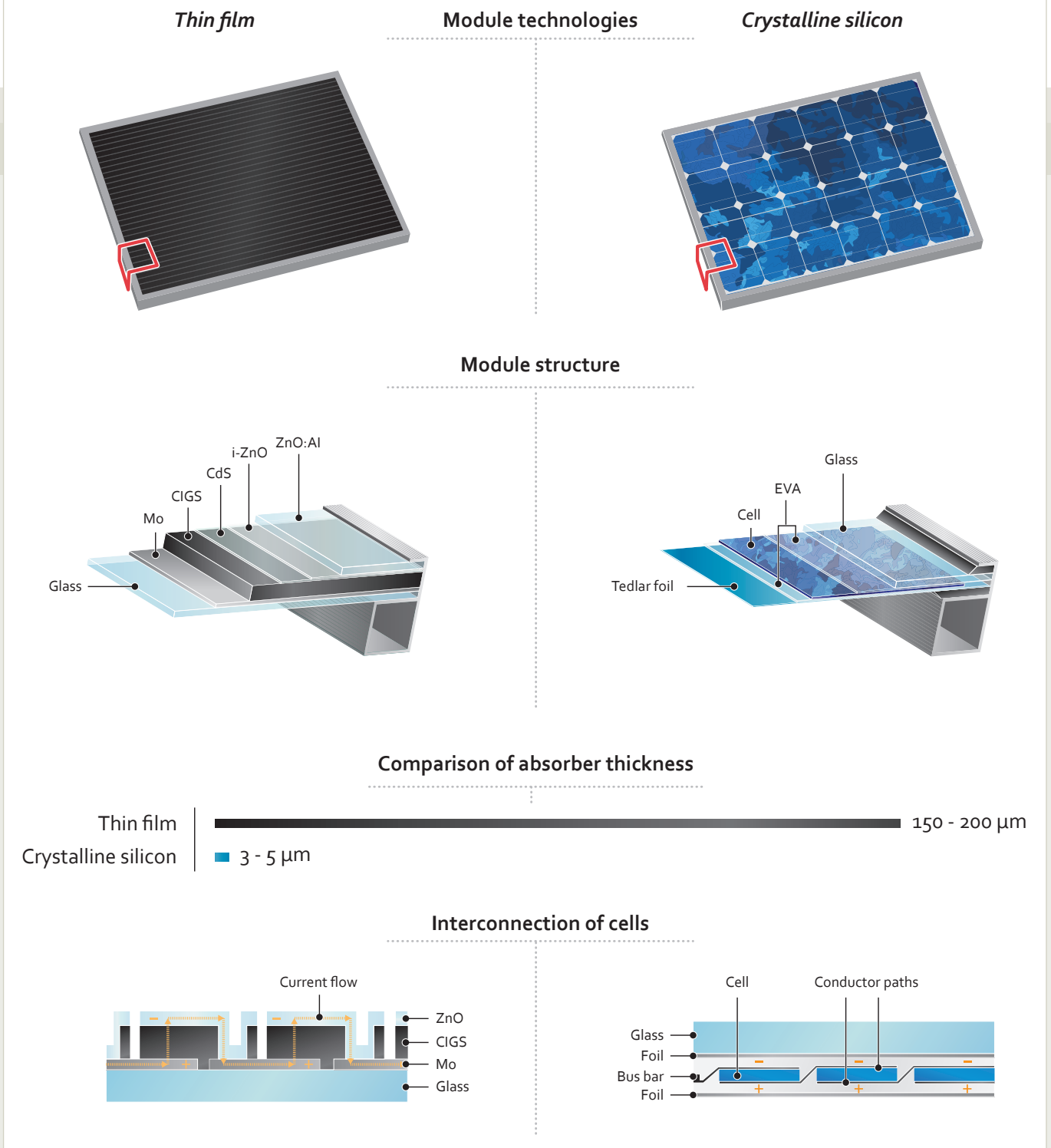
In addition to crystalline silicon, three alternative absorber materials are used for manufacturing solar cells: amorphous silicon (a-Si) or a combination of amorphous and microcrystalline silicon (a-Si/µc-Si), the compound semiconductor cadmium telluride (CdTe) or a compound semiconductor made of copper, indium, gallium and selenium (CIS or CIGS for short). Solar cells made from the three aforementioned materials are called thin-film solar cells because the absorbers are only a few micrometres thick. Only 0.2 kg of the semiconductor materials is required as the absorber for modules with an output of 1 kW. These absorbers are not self-supporting like silicon wafers but are deposited on substrates, which are mostly glass panes. The deposition process used in vacuum chambers is derived from architectural glass coating processes and the production of flat-screen displays.

The manufacture of thin-film modules therefore differs fundamentally from the manufacture of silicon-based technology. Individual cells are no longer processed but, instead, solar modules, with already interconnected cells, whereby the contact surfaces, absorber and additional intermediate layers are deposited on large glass panes in integrated processes. The layers are then laminated together under a second glass panel to form a finished solar module (see Fig. 5). All three aforementioned thin-film technologies have reached industrial maturity. In 2010, the total global production of photovoltaic modules with a-Si, CdTe and CIGS absorbers amounted to 2,262 MW, which comprised 13% of the total annual production of solar modules (see Table 1).

The simultaneous existence of crystalline silicon wafer technology with three rival thin-film technologies after decades of development is remarkable. It speaks for the solid technical concept behind each of these approaches and thus stabilises the industrial sector as a whole. The PV industry is currently very positive about the medium-term prospects for thin-film technologies in terms of their technical and economic competitiveness (see Fig. 6).

// ZSW: 20 years of research on thin-film solar modules

Since its foundation in 1988, the ZSW has made a major contribution to the development of thin-film PV. The research and development was focused on CIS and CIGS solar modules right from the beginning. In 1999, the technology developed at ZSW for



// Abb. 5: Vergleich des Aufbaus von Solarmodulen aus kristallinem Silizium und in Dünnschicht-Technologie.

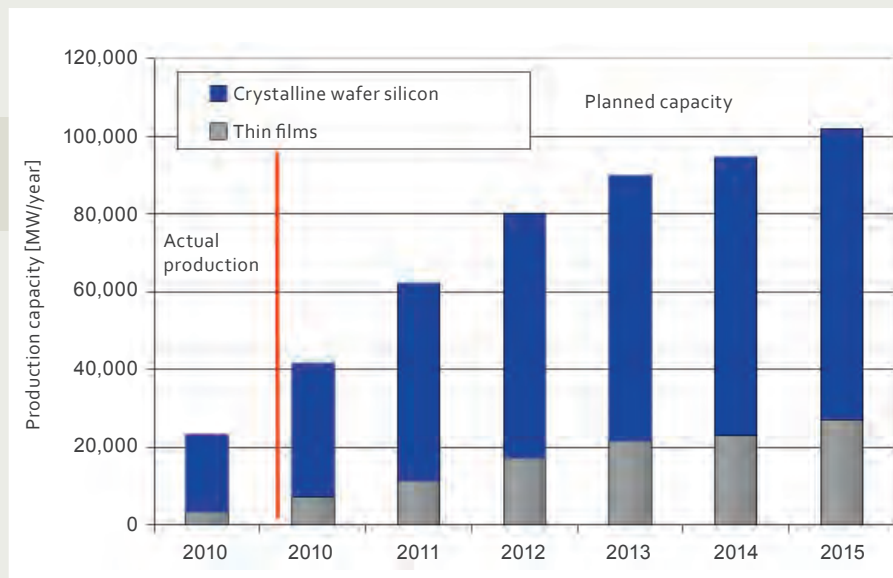
// Fig. 5: Comparison of the structure of solar modules made from crystalline silicon and using thin-film technology.

	Production 2010 ¹	Module efficiency 2010 ²	Module efficiency target 2016–2025 ³
c-Si mono	6,438 MW	14–20%	> 21%
c-Si poly	8,700 MW	12–17%	> 19%
CdTe	1,392 MW	10–12%	16%
a-Si	522 MW	7–10%	> 13%
CIGS	348 MW	12–13%	16–17%

// Tab. 1: Produktionsmengen und Wirkungsgrade industriell gefertigter Solarmodule der verschiedenen Technologien.

// Table 1: Production volumes and efficiencies of industrially produced solar modules for each of the various technologies.

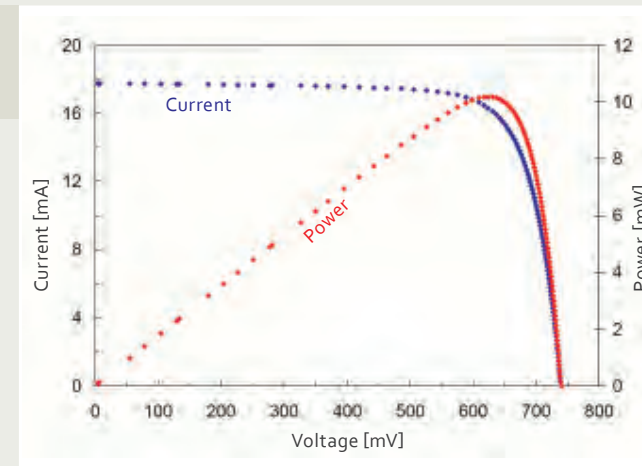
Quellen/Sources: (1) Paula Mints, Principal Analyst Solar Services Program, Navigant; (2) PV Status Report 2011, A. Jäger-Waldau, JRC-Institute for Energy, European Commission; (3) A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, Edition 2, European Commission 2011.



// Focus

// Abb. 6: Jährliche Produktionskapazitäten von Dünnschicht- und Wafersilizium-Modulen. Die Zahlen für 2010–2015 sind aus den veröffentlichten Plänen zu Produktionsausweitungen abgeleitet.
 // Fig. 6: Annual production capacities of thin-film and wafer silicon modules. The figures for 2010–2015 are derived from the published production expansion plans.

Quelle/ Source: PV Status Report 2011, A. Jäger-Waldau, JRC-Institute for Energy, European Commission.



// Abb. 7: Kennlinie der weltbesten CIGS-Solarzelle, hergestellt 2010 am ZSW (zugleich weltbeste Dünnschichtsolarzelle mit 20,3 % Wirkungsgrad). Messung zertifiziert durch das Fraunhofer ISE.

// Fig. 7: Characteristic curve of the world's best CIS solar cell, which was produced at ZSW in 2010 (also the world's best thin-film solar cell with 20.3% efficiency). The measurement has been certified by Fraunhofer ISE.

// ZSW: 20 Jahre Forschung für Dünnschichtsolarmodule

Zur Entwicklung der Dünnschicht-PV konnte das ZSW seit seiner Gründung im Jahr 1988 erheblich beitragen. Forschung und Entwicklung waren von Beginn an auf CIS- bzw. CIGS-Solarmodule fokussiert. Im Jahr 1999 wurde die am ZSW entwickelte Technik der Herstellung in Vakuumaufdampfanlagen an die Firma Würth Solar übertragen. Diese produziert Solarmodule seit dem Jahr 2000, zuletzt mit einer Jahreskapazität von 30 MW. Das ZSW war an der Entwicklung der Technik zur Produktionsreife kontinuierlich beteiligt. Ende 2011 hat die Manz AG in Reutlingen die Produktionslinie und das Produktions-Know-how von Würth Solar übernommen. Die Manz AG wird die CIGS-Technologie mit dem ZSW weiterentwickeln und bietet schlüsselfertige Produktionsanlagen für CIGS-Solarmodule an.

// CIGS-Solarzellen mit höchsten Wirkungsgraden

Der Weltrekord für den Wirkungsgrad einer Dünnschichtzelle wird seit 2010 vom ZSW gehalten. Er beträgt 20,3 % für eine Laborzelle (siehe Abb. 7). Ein Vergleich mit den besten Ergebnissen anderer Solarzellentechniken zeigt: Auf einem monokristallinen Siliziumwafer hat eine Forschergruppe der University of New South Wales in Australien 1998 den bis heute bestehenden Weltrekord für eine Siliziumzelle mit 25,0 % erzielt. Bei kostengünstigerem polykristallinem Silizium werden hingegen bisher 20,4 % erreicht. Damit liegt die CIGS-Technologie fast gleichauf mit der verbreitetsten und günstigsten polykristallinen Siliziumtechnologie. Die Rekordwerte im Labor lassen darauf schließen, dass auch bei kommerziell erhältlichen CIGS-Modulen noch deutliche Wirkungsgradsteigerungen möglich sind.

Für Mehrschichtzellen auf kristallinem Germanium bzw. Galliumarsenid erreichte die US-Firma Spectrolab 2009 mit Strahlungskonzentration einen Wirkungsgrad von 41,6 % (Prog. Photovolt: Res. Appl. 2011; 19:84–92). Dies ist der absolut höchste Wirkungsgrad, der je mit einer Solarzelle erzielt wurde. Noch ist der Einsatz von Solarzellen mit Strahlungskonzentratoren erst im Prototypstadium. Ein zukünftiger industrieller Einsatz der Technik wird aufgrund der Mehrkosten für die zusätzlich nötige Nachführung eher in den sehr sonnenreichen Standorten der Welt erfolgen.

manufacturing in vacuum deposition plants was transferred to the Würth Solar company. The company has been producing solar modules since the year 2000, most recently with an annual capacity of 30 MW. ZSW has been continually involved in the development of the technology to production readiness. At the end of 2011, Manz AG in Reutlingen took over the production line and the production know-how from Würth Solar. Manz AG, which will continue to develop the CIGS technology together with ZSW, offers turnkey production systems for CIGS solar modules.

// CIGS solar cells with maximum efficiencies

The world efficiency record for thin-film cells has been held by ZSW since 2010. It amounts to 20.3% for a laboratory cell (see Fig. 7). A comparison with the best results from other solar cell technologies shows: in 1998, a research group from the University of New South Wales in Australia achieved an efficiency value of 25.0% using a monocrystalline silicon wafer, which still remains the world record for a silicon cell until this day. However, a value of 20.4% has been achieved with cheaper polycrystalline silicon. CIGS technology is therefore almost on an equal footing with the most widespread and cheapest polycrystalline silicon technology – and the record values in the laboratory indicate that considerable increases in efficiency are also still possible with commercially available CIGS modules.

In 2009, the US company Spectrolab achieved an efficiency of 41.6% with irradiation concentration using multi-junction cells made of crystalline germanium and gallium arsenide (Prog. Photovolt: Res. Appl. 2011; 19:84–92). This is the highest efficiency to have ever been achieved for a solar cell. The use of solar cells with irradiation concentrators is still at the prototype stage. Because of the extra costs for the additionally required tracking system, the future industrial use of the technology is more likely in very sun-rich locations in the world.

// New deposition processes, substrate materials and absorbers

ZSW is also researching alternative materials and processes for solar cells with the aim of further reducing PV costs, reducing the materials required, conserving resources and opening up new application fields. To achieve the best efficiencies, thin-film solar

// Neue Abscheideverfahren, Trägermaterialien und Absorber

Zur weiteren Kostenreduktion in der PV, zur Verringerung des Materialeinsatzes, zur Schonung der Ressourcen und zur Erschließung neuer Anwendungsfelder erforscht das ZSW auch alternative Materialien und Prozesse für Solarzellen. Für beste Wirkungsgrade werden Dünnschichtsolarzellen im Vakuum bei hohen Temperaturen auf Glas abgeschieden. Vakuumkammern sind technisch aufwendig, und die Abschreibungen für die Fertigungsanlagen stellen nach den Materialkosten einen wesentlichen Anteil der gesamten Produktionskosten dar. Um die Kosten zu senken, kommen Druckverfahren in Frage, die gegenüber Aufdampfverfahren zwei wesentliche Vorteile bieten: Die Materialausbeute beim Abscheideprozess wird erhöht und ein Vakuum im Prozess ist nicht mehr notwendig (siehe Abb. 8).

Ein weiterer Weg zur Senkung von Fertigungskosten ist die Verwendung flexibler Träger wie dünne Stahlbleche oder Polymerfolien, die von der Rolle verarbeitet werden können. Im Technikum des ZSW wird auf einer Beschichtungsanlage für 30 cm breites Polyimidband die Prozesstechnik für die gleichzeitige Abscheidung eines

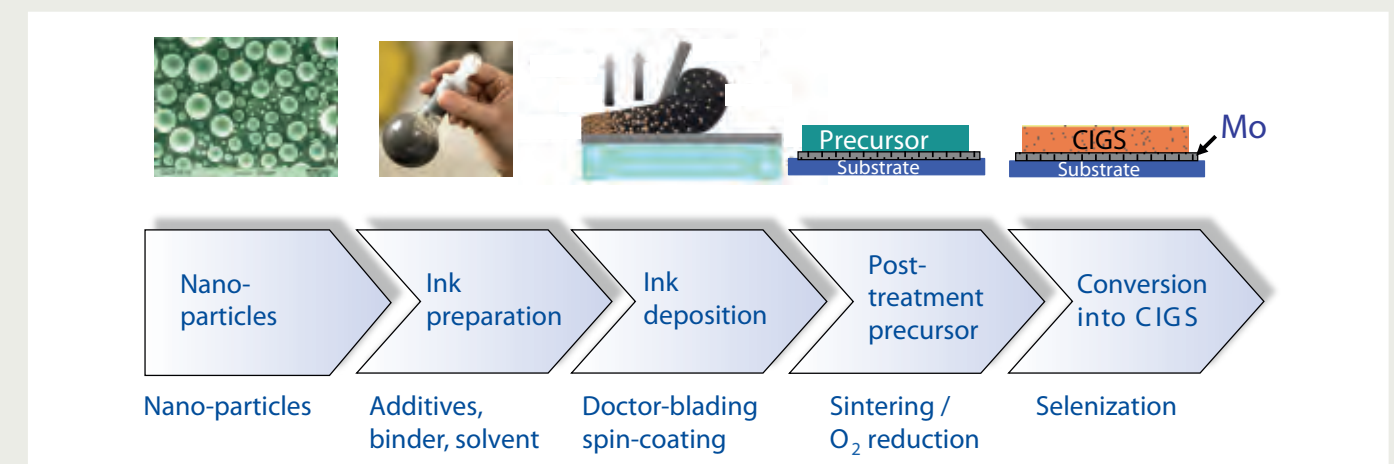
cells are deposited on glass in a vacuum at high temperatures. Vacuum chambers are technically complicated and, in addition to the material costs, the depreciation of the production plants represents a considerable proportion of the overall production costs. In order to lower the costs, an alternative is provided by printing processes that offer two major advantages compared with vapour deposition processes: the material yield is increased during the deposition process and a vacuum is no longer required in the process (see Fig. 8).

A further way to reduce production costs is to use flexible substrates such as thin steel sheeting or polymer films that can be processed from rolls. In ZSW's technical lab, the process technology for simultaneously depositing the molybdenum rear contact (by means of cathode sputtering), the absorber (simultaneous evaporation of copper, indium and gallium in a selenium atmosphere) and the front contact (cathode sputtering of zinc oxide) is being developed on a coating plant for 30 cm-wide polyimide film. Here the substrate film continually passes through the various processing stations within a single vacuum chamber. If the intermediate layer between the absorber and the front contact can also be integrated into the process, this will enable a kilometre-long strip of functioning solar cells to be produced that can then be cut and processed to form solar modules.

Thin, enamelled steel strips can also be processed using this roll-to-roll process. The best solar cells that have been produced on enamelled steel in ZSW's laboratory have an efficiency of 17.6% and the best small-scale module consisting of several individual

// Abb. 8: Prinzipbild eines Druckverfahrens für den CIGS-Absorber: Aus einer Suspension sehr kleiner Partikel der Ausgangsmaterialien wird mit Additiven eine druckbare Tinte hergestellt. Diese wird nach dem Aufbringen auf einen Träger wie etwa molybdänbeschichtetes Glas gesintert und anschließend unter Selenatmosphäre zu polykristallinem CIGS umgewandelt.

// Fig. 8: Diagram depicting the printing process used for CIGS absorbers: A suspension of nano-sized precursor materials is mixed with additives to produce a printable ink. Once this ink has been applied to a substrate, such as molybdenum-coated glass, it is sintered and then converted into polycrystalline CIGS in a selenium atmosphere.



// Focus

// Abb. 9: Flexibles Solarmodul auf Metallfolie aus dem ZSW-Labor.
// Fig. 9: Flexible solar module on metal foil from the ZSW laboratory.

Rückkontaktes aus Molybdän (durch Kathodenzerstäubung), des Absorbers (gleichzeitiges Verdampfen von Kupfer, Indium und Gallium in Selenatmosphäre) sowie des Frontkontaktes (Kathodenzerstäubung von Zinkoxid) entwickelt. Die Trägerfolie durchläuft dabei in einer einzigen Vakuumkammer kontinuierlich die verschiedenen Bearbeitungsstationen. Wenn im nächsten Schritt auch noch das Aufbringen der Zwischenschicht zwischen Absorber und Frontkontakt in den Prozess integriert ist, lässt sich ein kilometerlanges Band mit funktionsfähigen Solarzellen herstellen, das anschließend geschnitten und zu Solarmodulen verarbeitet werden kann.

Auch dünnes emailliertes Stahlband kann mit diesem Rolle-zu-Rolle-Verfahren verarbeitet werden. Die beste Solarzelle, die im ZSW-Labor auf emailliertem Stahl hergestellt wurde, hat einen Wirkungsgrad von 17,6 %, das beste integriert aus mehreren Einzelzellen verschaltete Kleinmodul erreicht schon sehr respektable 14,5 %. Die flexiblen Trägermaterialien bieten aber nicht nur Vorteile im Herstellungsprozess, sondern ermöglichen auch die Erschließung neuer Anwendungsfelder (z. B. abrollbare Photovoltaikdachbahnen und mobile Anwendungen; siehe Abb. 9).

Halbleiter aus organischen Verbindungen sind heute Standardtechnik in farbigen Smartphone-Bildschirmen. Damit können aber auch Bauelemente hergestellt werden, die Sonnenlicht in Strom wandeln. Auch hier gilt, dass Solarzellen aus organischen Halbleitern bei niedrigen Temperaturen ohne Vakuumtechnik großflächig auf verschiedenen – auch flexiblen – Trägermaterialien aufgebaut werden können. Die japanische Firma Mitsubishi Chemical erzielte im Juni 2010 den bisher höchsten Wirkungsgrad für eine organische Solarzelle mit 10,1 %. Noch werden also die Energiewandlungswirkungsgrade von polykristallinen Dünnschichtzellen nicht erreicht. Das Wissen über optimierte Bauelementstrukturen und Abscheideverfahren, die mikroskopische Struktur der verwendeten Materialien und ihre chemischen und elektronischen Eigen-

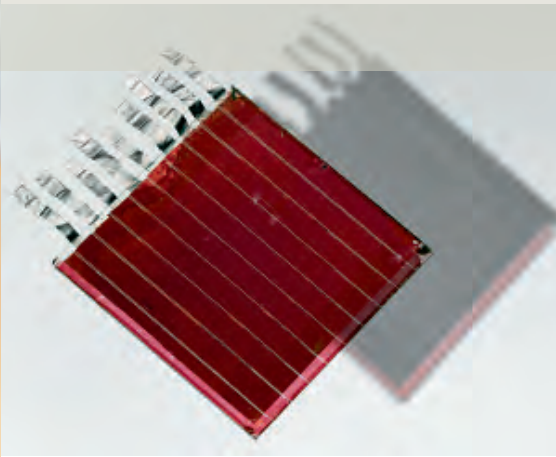
cells connected together has already achieved a respectable 14.5%. The flexible substrate materials not only offer advantages in terms of the production process but also open up new fields of application such as rollable PV roof membranes and mobile applications (see Fig. 9).

Semiconductors from organic compounds now provide the standard technology in coloured smart phone displays. However, these also enable components to be produced that convert sunlight into electricity: here, too, solar cells made of organic semiconductors can be extensively applied to various – including flexible – substrate materials at low temperatures and without vacuum technology. In June 2010, the Japanese company Mitsubishi Chemical achieved the highest efficiency to date for an organic solar cell with a value of 10.1%. Although the energy conversion efficiency achieved by polycrystalline thin-film cells has yet to be equalled, knowledge about optimised component structures and deposition processes as well as the microscopic structure of the materials used and their chemical and electronic properties is increasing rapidly. In this regard, ZSW is conducting research on the cell physics, efficiency improvements and scaling up the production processes, including the development of prototypes (see Fig. 10).

// Solar module tests as a ZSW service

Tests on the performance and stability of solar modules by independent testing facilities are essential for buyers, manufacturers and project developers.

In technical terms, the measurements are relatively complex: for physical reasons, it is not possible to “replicate” the sun – as the actual energy source – in the laboratory, since the light from laboratory lamps has a different wavelength distribution. Because, however, the efficiency of solar cells depends on the wavelength of the incident



// Abb. 10: Beispiel für ein Solarmodul mit organischem Absorber aus dem ZSW-Labor.
// Fig. 10: Example of a solar module with an organic absorber from the ZSW laboratory.



// Abb. 11: Solargeneratoren auf dem Testfeld des ZSW.
// Fig. 11: Solar generators at the ZSW testing facility.

schaften vermehrt sich aber rasch. Das ZSW erforscht hierbei verschiedene Aspekte der Zellphysik, der Wirkungsgradsteigerung und der Aufskalierung der Herstellungsprozesse bis hin zur Prototyp-Entwicklung (siehe Abb. 10).

// Solarmodultests als Dienstleistung des ZSW

Tests der Leistungsfähigkeit und der Stabilität von Solarmodulen durch unabhängige Prüfeinrichtungen sind für Käufer, Hersteller und Projektentwickler unverzichtbar.

Technisch sind die Messungen vergleichsweise aufwendig, was mehrere Gründe hat: Die Sonne als die eigentliche Energiequelle kann im Labor aus physikalischen Gründen nicht „nachgebaut“ werden, denn das Licht von Laborleuchten weist eine andere Wellenlängenverteilung auf. Weil der Wirkungsgrad einer Solarzelle aber von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes abhängt, müssen Umrechnungsverfahren die Brücke zwischen Labor und Realität bilden. Die Verfahren sind spezifisch für die verschiedenen Solarzellentypen. So verhalten sich etwa Solarmodule mit kristallinen Siliziumzellen anders als Dünnschichtmodule.

Nun könnte man Solarmodule natürlich im Freien vermessen. Die Wellenlänge des Lichtes ist dort aber von der Tages- und Jahreszeit, vom Wassergehalt der Atmosphäre und von der Bewölkung abhängig. Damit ist die Anzahl der Jahresstunden, an denen bei reproduzierbaren Lichtverhältnissen im Freiland gemessen werden kann, sehr klein. Deshalb schafft man reproduzierbare Messbedingungen im Labor und überprüft diese kontinuierlich anhand von Freilandmessungen (siehe Abb. 11). Weiterhin kann die Lebensdauer von Solarmodulen – mehr als 20 Jahre – nicht direkt gemessen werden. Jeder Lebensdauertest muss also unter Stressbedingungen für das Solarmodul erfolgen, die ein beschleunigtes Altern simulieren. Solche Testverfahren sind international standardisiert. Die schnelle Fortentwicklung der Modultechnik erfordert aber eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Testverfahren und der Methoden zur Interpretation der Ergebnisse. Nur so können die Risiken, die jede neue Technik für Hersteller, Nutzer und die Umwelt birgt, quantitativ erfasst und minimiert werden.

light, the conversion procedures have to bridge the gap between the laboratory and reality. The procedures are specifically designed for the various solar cell types. For example, solar modules with crystalline silicon cells behave differently to thin-film modules.

Of course, you could measure solar modules outdoors. However, the wavelength of the light outside depends on the time of day and the season, the water content of the atmosphere and the amount of clouds. This means that the number of hours in the year in which reproducible light conditions can be measured outdoors is very small. For this reason, reproducible measurement conditions are created in the laboratory and these are checked regularly using outdoor measurements. Furthermore, the service life of solar modules – which is more than 20 years – cannot be measured directly. This means that every service life test has to be conducted under stress conditions that simulate accelerated ageing. Such test procedures are internationally standardised. However, the rapid progression of module technology requires continual further development of the test procedures and methods for interpreting the results. It is only then that the risks that every new technology harbours for manufacturers, users and the environment can be quantitatively recorded and minimised.

Since 1989, ZSW has operated a test facility for solar modules and solar power systems in Widderstall near Merklingen in the Swabian Mountains. The site, which is located around 750 metres above sea level, is characterised by excellent solar irradiance conditions and cold winters with considerable amounts of snow. Here, solar power systems with inverters are operated as electric stand-alone or on-grid systems, and the energy yields of various PV technologies are recorded in direct comparison. On behalf of manufacturers and financial institutions, solar modules are continually measured as part of international comparison tests. The data on the performance behaviour or ageing effects are documented for later evaluation in databases.

In December 2011, ZSW's testing possibilities were expanded with an additional test facility near Barcelona. Here, tests on solar modules and generators can be conducted throughout the year with an irradiance that is one and a half times that in southern Germany.

Das ZSW betreibt seit 1989 ein Testfeld für Solarmodule und Solarsysteme in Widderstall bei Merklingen auf der Schwäbischen Alb. Der Standort auf ca. 750 m über dem Meeresspiegel ist durch sehr gute Sonneneinstrahlungsbedingungen und kalte, schnee-reiche Winter charakterisiert. Hier werden Solarsysteme mit Wechselrichtern im elektrischen Inselmodus oder in Netzeinbin-dung betrieben und die Energieerträge verschiedener Solartechni-ken im direkten Vergleich erfasst. Solarmodule werden im Rah-men internationaler Vergleichstests, im Auftrag von Herstellern oder Finanzinstitutionen kontinuierlich vermessen und die Daten zu Leistungsverhalten oder Alterungseffekten für die spätere Auswertung in Datenbanken dokumentiert.

Im Dezember 2011 wurden die Prüfmöglichkeiten des ZSW durch ein Testfeld bei Barcelona erweitert. Hier können ganzjährig und mit gegenüber Süddeutschland eineinhalbfach höherer Einstrah-lung Untersuchungen an Solarmodulen und -systemen durchge-führt werden.

Im Institutsgebäude in Stuttgart besteht seit 2010 ein Testlabor speziell für Dünnschichtmodule. Sonnensimulatoren, Klimakam-mern und Anlagen zur mechanischen und elektrischen Belastung von Modulen stehen für Standardtests, kundenspezifische Prü-fungen und entwicklungsbegleitende Untersuchungen zur Verfü-gung.

// Netzeinbindung und Speichermanagement von Solarstrom

Die Stromerzeugung von PV-Anlagen folgt zeitlich direkt dem Verlauf der Sonneneinstrahlung und nicht der Lastkurve der Stromverbraucher. Das ist kein Problem, solange der Anteil an der Stromerzeugung gering ist und weitere, in ihrer Leistung steuer-bare Stromquellen im Elektrizitätsnetz zur Verfügung stehen. Mit einem zunehmenden Anteil von Solarstrom in den Verteilnetzen stellen sich aber die technisch sehr anspruchsvollen Fragen der Netzeinbindung immer dringlicher.

Neben Lastmanagement und Netzausbau sind Speicher eine wichtige Option, um Stromerzeugung und -bedarf aufeinander abzustimmen. Im Zusammenspiel mit der PV sind insbesondere Batteriespeicher eine vielversprechende, am ZSW intensiv er-forschte Technologie. Die Speicherung kann den Wert des Solar-stroms erhöhen, indem sie eine fluktuierende „erzeugungsdefi-nierte“ Energiequelle in eine abrufbare „nachfragedefinierte“ Energiequelle umwandelt. Der „Eigenverbrauch“ und damit die Speicherung von photovoltaisch erzeugtem Strom am Ort der Erzeugung wird interessant aufgrund der rapide sinkenden Stromerzeugungskosten aus Photovoltaik, bei denen Photovol-taikstrom vielerorts günstiger wird als der Bezugspreis von Haushaltsstrom. Dieser Zusammenhang wird vielfach mit dem Erreichen von „grid parity“ (Netzparität) bezeichnet. Weiterhin wurde zum 1.1.2012 mit dem System der „Marktprämie“ eine neue Form des gezielten Anreizes zur bedarfsgerechten Strom-einspeisung in das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) aufge-



A test laboratory specifically for thin-film modules has been housed in the institute's building in Stuttgart since 2010. Solar simulators, climate chambers and systems for mechanical and electrical loads are available for standard tests, customer-specific investigations and tests on solar modules during the development phase.

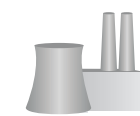
// Grid connection and storage management of solar power

Photovoltaic systems generate electricity in direct chronological relation to the course of solar radiation and not the load curve of the electricity consumer. This is not a problem as long as the overall share of the electricity produced by the photovoltaic systems re-mains small, and additional electricity sources are available in the grid whose output can be controlled. However, as the share of solar power in the distribution networks becomes larger, the considerable technical complexities relating to the grid connec-tion are becoming an increasingly pressing issue.

In addition to load management and grid expansion, storage sys-tems provide an important option for matching the generation of electricity with the demand. In conjunction with PV, battery stor-age systems in particular provide a highly promising technology that is being intensely researched at ZSW. Storage can increase the value of the solar power by converting a fluctuating, genera-tion-defined energy source into a retrievable, demand-defined energy source. With the advent of “grid parity”, the self-consump-tion of locally generated electricity provides economical benefit. “Grid parity” in this context is reached when cost from PV-gener-ated energy begins to be lower than that of electricity supplied by the utilities to the customer. In addition, the “market premium” system introduced with the Renewable Energy Sources Act (EEG) on 1 January 2012 offers a new form of targeted incentives for feeding demand-oriented electricity into the grid. In a pool with other renewable energies, new marketing strategies (for example sales during high-price phases) can also provide an interesting option for photovoltaic and battery storage systems. Photovoltaic systems that feed electricity decentrally into the distribution

Power Balancing

Large scale power plants

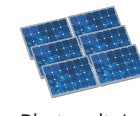


Fossil & nuclear



Off-shore wind

Distributed fluctuating generation

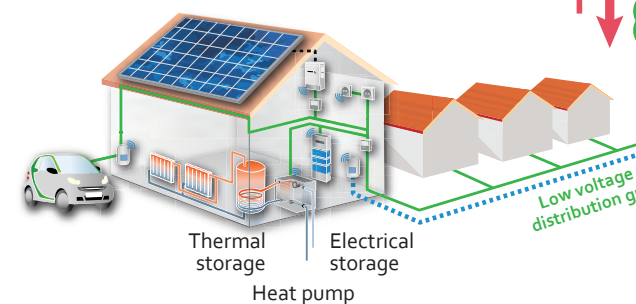


Photovoltaics



On-shore wind

Local generation, storage and load management



Thermal storage

Electrical storage

Heat pump

Low voltage distribution grid

High voltage transmission

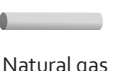
Medium voltage distribution grid

Network control & grid stability

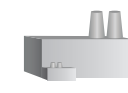
Distributed storage and balancing generation



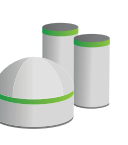
SNG



Natural gas



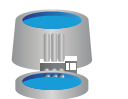
CCPP, B-CHP



Bio gas



Battery storage



Pumped hydro

Regional control & tariffs

// Abb. 12: Veranschaulichung der Lastflüsse und Kommunikationswege im Energiesystem zur Angleichung der zum Teil fluktuierenden Erzeugung und des zeitabhängigen Verbrauchs durch Speicherung (SNG: Substitute Natural Gas / erneuerbares Methan), Lastmanagement und schnell regelbare Stromerzeugung (balancing generation) durch Gaskraftwerke (CCPP: Combined Cycle Power Plant = GuD) oder Blockheizkraftwerke (B-CHP: Block-type Combined Heat and Power = BHKW).

// Fig. 12: Diagram depicting the load flows and communication routes in the energy system for balancing the partly fluctuating generation and time-dependent consumption of electricity by means of storage (SNG: Substitute Natural Gas / renewable methane), load management and rapid power balancing using CCPP (Combined Cycle Power Plant) and B-CHP (Block-type Combined Heat and Power) plants.

nommen. Im Pool mit anderen erneuerbaren Energien können neue Vermarktungsstrategien (z. B. Verkauf während hochprei-siger Phasen) auch für PV-Anlagen und Batteriespeicher eine inte-ressante Option darstellen. Photovoltaische Stromerzeuger, die dezentral in Verteilnetze einspeisen und bei Netzstörungen mit ihrem eigenen Speicher einen elektrischen Inselbetrieb aufrecht-erhalten, können einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Stromversorgung leisten und damit Produktivität, Sicherheit und Nutzerkomfort deutlich verbessern.

Das ZSW untersucht gemeinsam mit Stromversorgern, Wechsel-richter- und Batterieherstellern sowie Forschungseinrichtungen die Technik und Anwendbarkeit von verschiedenen Speicherarten im Zusammenhang mit Regelungen in den Verteilnetzen und im Übertragungsnetz. Dabei kommt der Verteilung, Erzeugung und intelligenten Steuerung (Smart Grid) eine besondere Bedeutung zu. Wie in Abb. 12 dargestellt, können dezentrale Speicher zur Netzentlastung eingesetzt werden. Verbraucherseitig werden Haushaltsgeräte und auch die Wärmeversorgung eingebunden. Besonders die auch am ZSW entwickelten Lithium-Ionen-Batterien werden als lokale Stromspeicher im Zusammenspiel mit dem Stromnetz optimiert. Die Technologien von Erzeugung, Verteilung und Speicherung werden am ZSW zusammen mit ökonomischen und systemanalytischen Aspekten fachgebiets- und standort-übergreifend erforscht.

grids, and which can maintain stand-alone electrical operation in the event of grid disruptions through using their own storage sys-tems, can make an important contribution to improving the elec-tricity supply and thus considerably improve productivity, safety and convenience for the user.

Together with power suppliers, inverter and battery manufactur-ers as well as research institutions, ZSW is investigating the tech-nology for various types of storage and their applicability in con-junction with control systems in the distribution and transmission grids. Here an important role is played by the generation, distribu-tion and intelligent control of electricity (smart grid). As shown in Fig. 12, decentralised storage systems can be used to reduce the loads in the grid. On the load side, both household appliances and heat supplies will be incorporated. In particular, the lithium-ion batteries newly developed by ZSW will be optimised as local elec-tricity storage systems in interaction with the electricity grid. ZSW is conducting interdisciplinary and multi-site research into the generation, distribution and storage technologies in conjunc-tion with economic and system-analytical aspects.

// Authors

Prof. Dr. Michael Powalla
Maïke Schmidt



// Fachgebiete und Projekte
Departments and Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Die Energiewende ist spätestens seit dem Jahr 2011 in aller Munde. Doch mit ihr ist viel mehr verbunden, als erneuerbare Energietechnologien zu entwickeln und damit konventionelle und nukleare Energieträger zu ersetzen. Wie weit sind wir mit der Nutzung der erneuerbaren Energien schon gekommen? Wie wirken Förderprogramme und wie müssen sie weiterentwickelt werden, um die Ausbauziele zu erreichen? Welche Kosten und welcher ökonomische Nutzen sind mit der Energiewende verbunden? Wie werden sich die Energiemärkte zukünftig entwickeln, und welche Rolle werden Speichertechnologien spielen? Mit diesen und anderen Fragen beschäftigt sich das interdisziplinäre Team aus Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaftlern des Fachgebiets Systemanalyse.

Mit der Entwicklung und Evaluierung von Förderinstrumenten, ökonomischen Analysen der erneuerbaren Energien allgemein bzw. von PV und Speichertechnologien im Besonderen sowie der Erstellung von Szenarien zeigt das Fachgebiet im Rahmen der Politikberatung auf Bundes- und Landesebene 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. Unsere Kompetenz bei der Entwicklung und Anwendung leistungsfähiger Vorhersagemodelle für die Wind- und Solarstromerzeugung rundet das Profil des Fachgebiets ab.

// Our main focus

The energy turnaround has been on everyone's lips since 2011 at the latest. It is concerned, however, with much more than developing renewable energy technologies and thus replacing conventional and nuclear fuels. How much progress has already been made in utilising renewable energy sources? What sort of impact do funding programmes have and how must they be further developed in order to achieve the development goals? What are the costs and economic benefits of the energy turnaround? How will the energy markets develop in future and what role will be played by storage technologies? An interdisciplinary team of scientists, engineers and economic experts in the Systems Analysis department is examining these and other questions.

In addition to developing and evaluating incentive instruments, economically analysing renewable energies in general and PV and storage technologies in particular, the research department is also sketching out possible development routes. As part of its policy consultation at the national and regional level, this enables the research department to demonstrate how renewables and storage and efficiency technologies can be introduced to the market and how our energy supply system can be restructured in the long term. In addition, the research department has many years of experience in monitoring the utilisation of renewable energies including the development of scientifically based statistics at the national and regional level. The research department's main focus area is rounded off by its expertise in the development and application of powerful forecast models for wind and solar power generation.

// Contact

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

// Monitoring für die Energiewende

Monitoring for the energy turnaround

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

Mit dem Energiekonzept vom September 2010 und den erweiterten Energiewendebeschlüssen vom Juni 2011 hat die Bundesregierung einen weitgehenden Umbau unserer Energieversorgung beschlossen. Im Zentrum steht dabei der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien. Das erste Etappenziel ist klar definiert: Bis zum Jahr 2020 sollen mindestens 18 % des Endenergieverbrauchs und mindestens 35 % des Stromverbrauchs mit erneuerbaren Energien gedeckt werden. Ambitionierte Zielsetzungen erfordern ein belastbares Monitoring. Hierfür trägt die vom Bundesumweltministerium eingerichtete Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) Verantwortung. Das unabhängige, mit Vertretern aus Ministerien, Bundesämtern und Fachinstitutionen besetzte Fachgremium arbeitet seit 2004 im Auftrag des Bundesumweltministeriums. Bis zum Jahr 2015 obliegen Koordination und Leitung der AGEE-Stat dem Fachgebiet Systemanalyse des ZSW. Im Rahmen dieser Arbeit bilanzieren wir den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland in fortlaufend aktualisierten Statistiken. Diese bilden auch die Grundlage für die Unterstützung der Bundesregierung bei der Erfüllung zahlreicher nationaler und internationaler Berichtspflichten. Unsere Arbeiten bestätigen die Erfolge des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland: Im Jahr 2011 hatten Sonne, Wind & Co. bereits einen Anteil von rund 20 % am gesamten Stromverbrauch. Mit mehr als 3 % lag die PV dabei erstmals auf Augenhöhe mit der Wasserkraft.

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

With its Energy Concept from September 2010 and its expanded resolutions on the energy turnaround that were adopted in June 2011, the German government has decided to make extensive structural changes to our energy supply. A particular focus will be on expanding the utilisation of renewable energy sources. The first milestone has already been clearly set out: this envisages that at least 18% of the end energy consumption and at least 35% of the electricity consumption shall be covered by renewable energies by 2020. However, these ambitious goals require reliable monitoring. The responsibility for this is held by the Working Group on Renewable Energies – Statistics (AGEE-Stat), which has been set up by the German Ministry of the Environment. The independent expert committee, which comprises representatives from the ministries, federal agencies and specialist institutions, has been working on behalf of the Environment Ministry since 2004. Until 2015, ZSW's Systems Analysis department will be in charge of coordinating and heading AGEE-Stat. As part of this work, we review the utilisation of renewable energies in Germany with continually updated statistics. These also form the basis for helping the German government meet numerous national and international reporting obligations. Our work confirms the successes achieved in developing renewable energies in Germany: in 2011, solar, wind and other renewable energy sources already accounted for about 20% of the overall electricity consumption. With more than 3%, PV is now on an equal footing with hydropower.



”



// Dr. Frank Musiol

Wir bringen die Energiewende mit fundierten Analysen und Strategien für politische Entscheidungsträger voran.

We're driving forward the energy turnaround with profound analyses and strategies for political decision makers.

// Energieszenario

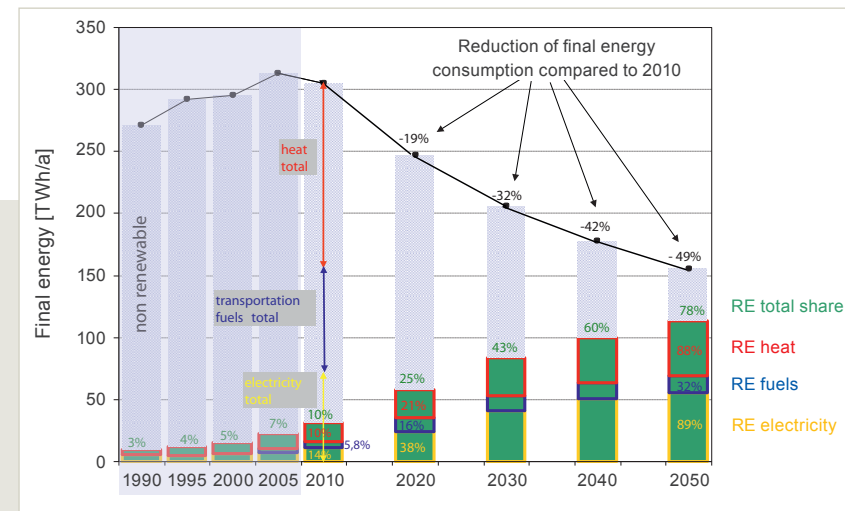
Energy scenario

// Energieszenario für Baden-Württemberg: Gutachten zur Vorbereitung eines Klimaschutzgesetzes

Ein zentrales Element der zukünftigen Energie- und Klimapolitik in Baden-Württemberg soll ein Klimaschutzgesetz mit verbindlichen Treibhausgasminderungszielen sein. Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft hat das Fachgebiet Systemanalyse daher beauftragt, hierfür in Zusammenarbeit mit Dr. Joachim Nitsch ein Energieszenario 2050 zu entwickeln, aus dem ambitionierte, aber realistische Treibhausgasminderungsziele abgeleitet werden können.

Das Szenario berücksichtigt einerseits die europäischen und bundesdeutschen Rahmenbedingungen, bildet andererseits aber auch die landesspezifischen Gegebenheiten ab. Insbesondere für die erforderlichen grundlegenden Veränderungen der Kraftwerksstruktur in Baden-Württemberg wird ein gangbarer Entwicklungspfad aufgezeigt.

Die Ergebnisse machen deutlich: Für erfolgreichen Klimaschutz ist eine deutliche Reduktion des Endenergiebedarfs, die mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien in allen Bereichen der Energiebereitstellung Hand in Hand gehen muss, unabdingbar. In der Abbildung unten sind die notwendigen Reduktionen des Endenergieverbrauchs in den einzelnen Verbrauchssparten ebenso dargestellt wie der notwendige Ausbau der erneuerbaren Energien. Da Transformationsprozesse im Energiebereich erhebliche Zeiträume in Anspruch nehmen, ist es wichtig, rechtzeitig die richtigen Weichenstellungen vorzunehmen. Gelingt dies nur mit Verzug, müssen bei der Umstellung mit fortschreitender Zeit immer höhere Gradienten erzielt werden, um das Erreichen der Klimaschutzziele für 2050 noch sicherzustellen.



// Contact

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

// Energy scenario for Baden-Württemberg: Appraisal report for preparing a climate protection law

A central element of the future energy and climate policy in Baden-Württemberg shall be a climate protection law with binding goals to reduce greenhouse gas emissions. The Ministry of the Environment, Climate Protection and an Energy Sector has therefore commissioned the Systems Analysis department, in conjunction with Dr. Joachim Nitsch, to develop an Energy Scenario 2050 from which ambitious but realistic greenhouse gas reduction goals can be derived.

The Scenario shall not only take into account the European and national frameworks but also reflect the specific regional situation. In order to achieve the necessary fundamental changes to the power plant structure in Baden-Württemberg, a feasible development path is being developed.

The results clearly show that successful climate protection requires a considerable reduction in the final energy demand, which must go hand in hand with the development of renewable energy in all areas of energy provision. As shown in the graph, below the necessary reduction of the final energy consumption has to be accompanied by a dynamic development of renewable energy in all energy-related sectors. Because transformation processes in the energy sector require considerable time, it is important to set the right course in good time. Any delays in the transformation will mean that an increasingly uphill task will be faced as time passes in order to ensure that the climate protection goals for 2050 are still achieved.

// Photovoltaik-Einspeiseprognosen

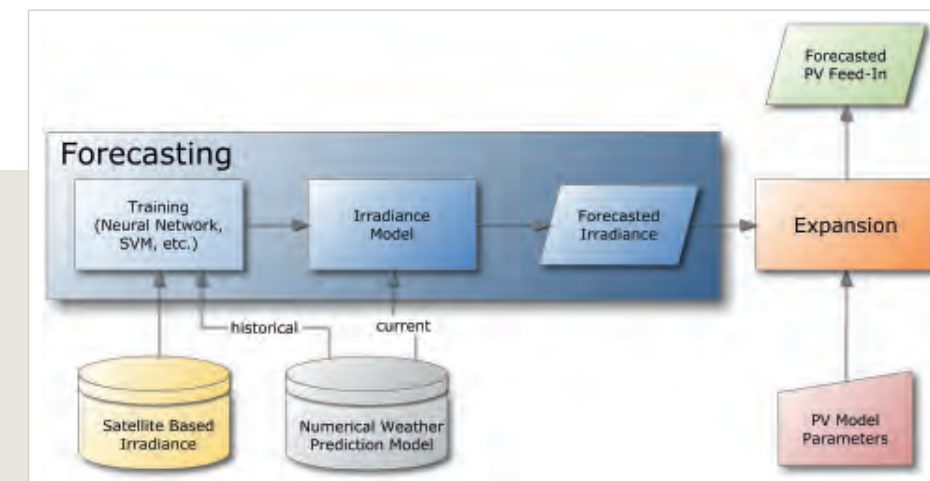
Photovoltaic feed-in forecasts

Photovoltaik-Einspeiseprognosen mit dem Solarstrom-einspeisungssimulator SolStEiS

Das Modell SolStEiS dient der Hochrechnung der Solarstrom-einspeisung auf Basis von PV-Einspeisungsdaten und satellitengestützten Einstrahlungsdaten. Dabei ist es möglich, unterschiedlichste Aggregationsstufen abzubilden, in denen sowohl aktuelle als auch historische Einspeisungen berechnet sowie Prognosen der Einspeisung für bis zu 72 Stunden erstellt werden können.

Das Modell für Deutschland ermittelt zunächst die solare Einstrahlung auf geneigte Flächen. Mit Hilfe der Einspeisedaten aus der PV-Datenbank der Bundesnetzagentur wird dann die Performance Ratio (PR) für jede Anlage berechnet. Die Einspeiseleistung kann daher in beliebigen Aggregationsgebieten zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden, für den satellitenbasierte Einstrahlungsdaten zur Verfügung stehen. Die PV-Stromeinspeisung für 2010 konnte so bereits vor Veröffentlichung der offiziellen Daten auf 3% genau hochgerechnet werden. Jahresprognosen der Einspeisung sind möglich, indem Zubauleistung und örtliche Verteilung abgeschätzt werden. Zudem kann das Wettergeschehen etwa mit Hilfe früherer Mittelwerte simuliert werden.

Für die Prognose der Einstrahlung im Zeithorizont von bis 72 Stunden wird ein Wettervorhersagemodell genutzt. Hierfür verwenden wir Data-Mining-Verfahren, um den Zusammenhang zwischen Vorhersage und Einstrahlung zu modellieren. Die vorhergesagte Einstrahlung kann dann wie die Satellitendaten für die Hochrechnung verwendet werden. Die Weiterentwicklung des Modells konzentriert sich derzeit auf die Optimierung der räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie auf eine weitere Verbesserung der Einstrahlungsprognose.



// Contact

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

// Photovoltaic feed-in forecasts with the SolStEiS solar power feed-in simulator

The SolStEiS model is used for forecasting the solar power fed into the grid based on photovoltaic feed-in data and satellite-supported irradiance data. Here it is possible to depict a diverse range of aggregation levels in which both current as well as historic feed-ins can be calculated and feed-in forecasts can be produced for up to 72 hours.

The model for Germany first of all determines the solar irradiance on inclined surfaces. Using the feed-in data from the Federal Network Agency's photovoltaic database, the performance ratio (PR) for each installation is then calculated. The feed-in performance can therefore be determined in any aggregation area and at any time for which satellite-based irradiance data is available. This enabled the forecast of the photovoltaic electricity fed into the grid in 2010 at an error margin of only 3% before the publication of the official data. Annual feed-in forecasts are possible by estimating the newly installed power and its local distribution. In addition, the weather conditions can be simulated using previous mean values.

A weather forecast model is used for predicting the irradiance for up to 72 hours. For this purpose we utilise data mining processes in order to model the relation between the forecast and the irradiance. As with the satellite data, the forecasted irradiance can then be used for the projection. The further development of the model is currently concentrating on optimising the spatial and temporal resolution as well as on further improvements to the irradiance forecasts.

// 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 am ZSW 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 weitgehend für Durchlaufprozesse ausgelegt, sodass eine große Nähe zu industriellen Verfahren gegeben ist (Arbeitsgruppe FACIS).

Für den Einsatz von flexiblen Substratmaterialien anstelle des Glassubstrates wurden in einem zweiten, teilweise noch im Ausbau befindlichen Technikum für eine Rolle-zu-Rolle-Beschichtung von flexiblen CIGS-Modulen bereits gute Erfolge erzielt (Arbeitsgruppe FLEXIS, siehe Bericht auf S. 36). Neue kostengünstige Depositionsverfahren, wie z. B. Drucktechnologien, werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme in einem eigenen Labor weiterentwickelt (Arbeitsgruppe NEMA).

Die langjährigen Erfahrungen des MAT-Teams in der Entwicklung von CIGS-Dünnschicht-Solarmodulen fließen auch in Dienstleistungen für die Industrie ein: Im Kundenauftrag übernehmen wir vielfältige Analytaufgaben (hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse), Beschichtungen (metallische Kontaktschichten und transparent-leitfähige Schichten), Kennlinienmessungen sowie Stabilitätstests an Verkapselungsmaterialien.



// Contact

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

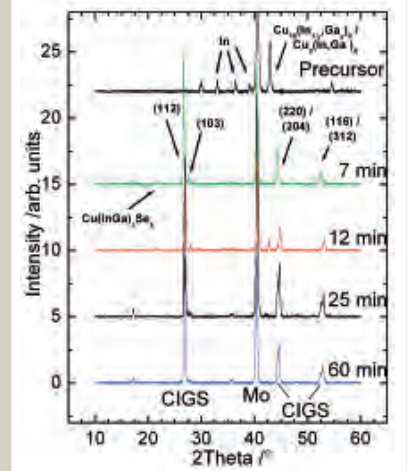
// Our main focus

The use of thin-film technologies offers considerable potential for reducing the costs of photovoltaic solar modules. With its high efficiencies and highly developed production technology, thin-film technology based on copper, indium, gallium and selenium (CIGS) has particularly proved itself in industrial production. The CIGS technical lab includes all the machines and systems necessary at all stages for producing thin-film solar modules, ranging from the preparation of the glass substrates to the fixing of the connection cables. In contrast to laboratory operation, the systems are largely engineered for throughput processes and therefore closely mirror industrial processes (FACIS working group).

For deploying flexible substrate materials instead of glass substrates, a second technical lab for the roll-to-roll coating of flexible CIGS modules has already achieved major successes although it is still being expanded (FLEXIS working group, see report on page 36). New cost-effective deposition processes such as print technologies are being developed for new organic and inorganic semiconductor systems in a special laboratory (NEMA working group).

The MAT team's many years of experience in developing CIGS thin-film solar modules is also being utilised in services offered to industry: on behalf of customers, we provide analytical support (high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis), coatings (metal contact layers and transparent conductive layers), characteristic curve measurements and stability tests on encapsulation materials.

// XRD-Daten für eine Vorläuferschicht und selenisierte Schichten bei verschiedenen Selenisierungsdauern. Das Diffraktogramm deutet auf die Existenz von Indium sowie $\text{Cu}_{16}(\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y)_9$ und/oder $\text{Cu}_3(\text{In,Ga})_4$ in der Schicht hin. Alle unerwünschten kristallinen Phasen sind nach 25 Min. verschwunden, sodass nur noch CIGS gefunden wird.
// XRD data for a precursor layer and selenised layers with various selenisation durations. The diffractogram indicates the existence of indium as well as $\text{Cu}_{16}(\text{In}_{1-y}\text{Ga}_y)_9$ and/or $\text{Cu}_3(\text{In,Ga})_4$ in the layer. All unwanted crystalline phases have vanished after 25 minutes so that only CIGS remains.



// Neue Materialien und Prozesse

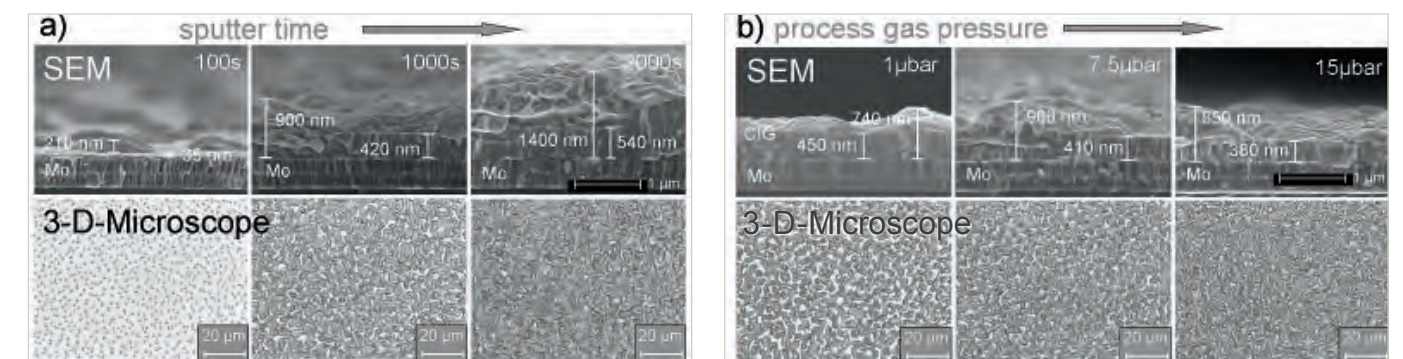
New materials and processes

// Selenisierung von metallischen Vorläuferschichten

Das ZSW entwickelt druckbare und kostengünstige, vakuumfreie Herstellungsmethoden für $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS)-Solarzellen. Hierbei werden aus Tinte aufgebrachte Ausgangsschichten unter Selenatmosphäre zur gewünschten Halbleiterstruktur umgewandelt. Zur Optimierung dieses Prozesses werden aus einem neuartigen ternären Sputtertarget Referenzschichten aus CuInGa hergestellt, die als Vorläuferschichten für verschiedene Selenisierungsprozesse verwendet werden. Die chemischen und physikalischen Schichteigenschaften sowohl bei der Schichtabscheidung als auch bei der chemischen Umwandlung werden untersucht. Wie in der Abbildung unten erkennbar, ist die Schichtstruktur je nach Sputterdauer und Sputtergasdruck sehr unterschiedlich. Es kommt dabei zur Segregation verschiedener chemischer Phasen mit unterschiedlicher Zusammensetzung. Während des Selenisierungsprozesses bilden sich anschließend ebenfalls unterschiedliche quaternäre Phasen, wie die Abbildung oben in Form von Röntgenbeugungsmustern zeigt. Ab einer optimalen Prozessdauer überwiegt die gewünschte $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ -Phase. Mit solchen Schichten konnten Effizienzen von über 13 % demonstriert werden.

// Selenisation of metallic precursor layers

ZSW is developing printable, cost-effective and vacuum-free methods for producing $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) solar cells. Here, ink-based precursor layers are converted into the desired semiconductor structure within a selenium atmosphere. To optimise this process, reference layers made of CuInGa , which are produced from an innovative ternary sputter target, are used as precursor layers for various selenisation processes. The chemical and physical layer properties are investigated both during the layer deposition and the chemical transformation. As can be seen in the figure below, the layer structure varies considerably, depending on the sputter duration and the sputter gas pressure. This causes the segregation of various chemical phases with different compositions. During the selenisation process, different quaternary phases also then form, such as in the form of x-ray diffraction patterns as shown in the figure above. The desired $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ phase prevails at an optimum process duration. Cells with such layers can show efficiencies of more than 13%.



// REM-Querschnittsaufnahmen und 3-D-Mikroskop-Aufnahmen der Schichtoberflächen von
a) Vorläuferschichten, die bei einem konstanten Gasdruck von 2,5 µbar gesputtert wurden, und
b) von Vorläuferschichten, die bei einer konstanten Sputterzeit von 1.000 Sek. gesputtert wurden.
// REM cross-sectional images and 3D microscopic images of the layer surfaces for:
a) Precursor layers that were sputtered at a constant gas pressure of 2.5 µbar, and
b) Precursor layers that were sputtered with a constant sputter time of 1,000 seconds.

// Contact

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

”



// Dr. Wiltraud Wischmann

Der starke Preisdruck in der Photovoltaik intensiviert den Wettbewerb zwischen den Technologien. Zur Kostenreduzierung optimieren wir Materialsysteme und Herstellungsverfahren für CIGS-Dünnschichtmodule auf festen und flexiblen Substraten.

The considerable price pressure in photovoltaics is intensifying the competition between technologies. In order to reduce costs, we are optimising material systems and production processes for CIGS thin-film modules on solid and flexible substrates.

// Flexible Dünnschicht-Solarzellen

Flexible thin-film solar cells

// Emailliertes Stahlblech als Substrat

Auf der Suche nach neuen, kostengünstigen und potenziell flexiblen Substraten für die CIGS-Abscheidung wurden im Rahmen des EU-Verbundprojekts hipoCIGS (siehe hipocigs.zsw-bw.de) in enger Zusammenarbeit mit einem Emaille-Hersteller Beschichtungen auf Stahlblech entwickelt, die Temperaturen bis 650 °C im Vakuum und in Selenatmosphäre standhalten, ohne sich chemisch oder physikalisch zu verändern. Erste Versuche dazu wurden bereits vor einigen Jahren auf bilateraler Ebene durchgeführt. Die Schichten wurden in ihrer Zusammensetzung so optimiert, dass die Oberflächenrauheit und -härte eine mechanische Strukturierung der CIGS-Schicht mittels Meißel erlaubt, ohne dass dieser oder das Emaille beschädigt wird. Die Zusammensetzung wurde ferner so gewählt, dass bei hohen Substrattemperaturen eine optimale CIGS-Dotierung mittels Natriumdifusion aus der Emailleschicht erfolgt, ohne weitere externe Natriumzugabe. Das Dielektrikum stellt auch eine hervorragende Barriere gegen die Diffusion von Eisen und anderen unerwünschten Elementen aus dem Stahlsubstrat dar.

Das Foto oben zeigt ein Stück emailliertes Stahlblech als Substrat für flexible CIGS-Dünnschichtmodule. Der höchste bisher auf diesem Substrat erzielte Kleinzellenwirkungsgrad mit einem „Standard“-Absorber im Format 30 cm x 30 cm aus der Inline-Anlage des ZSW liegt derzeit bei 17,6 % (mit Antireflexionsbeschichtung, siehe Abb. unten). Auch die Herstellung monolithisch verschalteter Module bis zu einer Substratgröße von 20 cm x 30 cm war möglich. Ein Kleinmodul mit zehn Zellen auf einem 10 cm x 10 cm großen Substrat erreichte dabei einen Wirkungsgrad von 15 % (mit Antireflexionsbeschichtung). Die Strukturierung erfolgte mittels Standardmethoden, wie sie auch auf Glassubstrat angewandt werden.

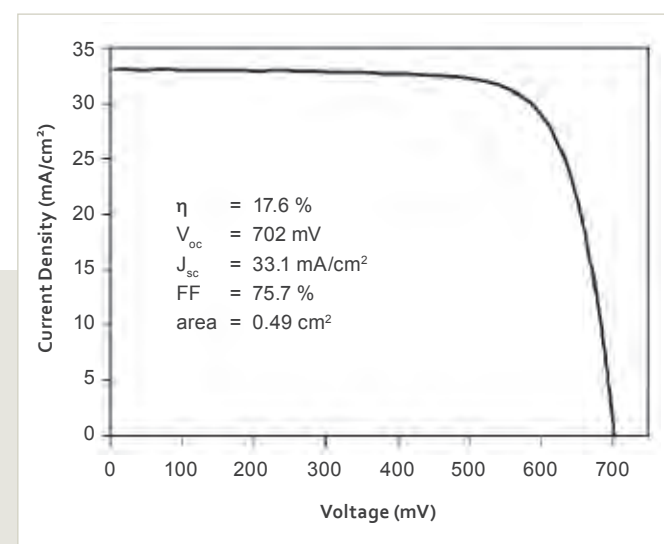
// Beste Zelle auf emailliertem Stahlsubstrat mit 17,6 % Wirkungsgrad (zertifiziert von Fraunhofer ISE).

// Best cell on enamelled steel substrate with an efficiency of 17.6% (certified by Fraunhofer ISE).

// Enamelled steel sheeting substrates

In the search for new, cost-effective and potentially flexible substrates for depositing CIGS as part of the EU's joint hipoCIGS project (see hipocigs.zsw-bw.de) coatings on steel sheeting have been developed in close cooperation with an enamel manufacturer. They can withstand temperatures of up to 650 °C in a vacuum and in a selenium atmosphere without changing chemically or physically. The first experiments were already conducted a few years ago at the bilateral level. The composition of the layers was optimised to such an extent that the surface roughness and hardness enables mechanical structuring of the CIGS layer using a mechanical scribe without damaging either the scribe or the enamel. In addition, the choice of composition enables optimum CIGS doping to be achieved at high substrate temperatures by means of diffusion on the enamel layer without the need for adding additional external sodium. The dielectric material also provides an excellent barrier against diffusion by iron and other undesired elements from the steel substrate.

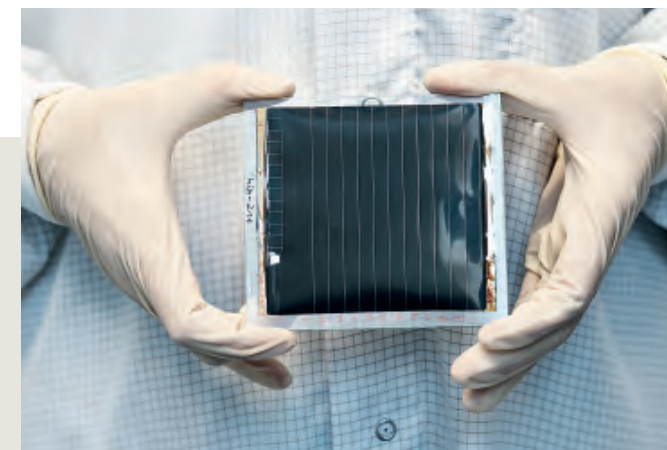
The photo above shows a piece of enamelled steel sheeting used as a substrate for flexible CIGS thin-film modules. The highest small-cell efficiency that has been achieved so far on this substrate using a "standard" absorber from ZSW's 30 cm x 30 cm inline plant is currently 17.6% (with anti-reflective coating). The manufacture of monolithically connected modules up to a substrate size of 20 cm x 30 cm was also achieved, whereby a small module with ten cells on a 10 cm x 10 cm substrate achieved an efficiency of 15% (with an antireflective coating). The structuring was carried out using standard methods that are also applied to glass substrates.



// Rolle-zu-Rolle-CIGS-Beschichtung auf Polymerband

Schwerpunkt der Arbeiten in der Ende 2009 aufgebauten Rolle-zu-Rolle(R2R)-Anlage bildete die Verbesserung der mittels Ko-verdampfung abgeschiedenen Cu(In,Ga)Se₂-Schicht. Um den Absorber zu bewerten, musste zunächst der Molybdän-Rückkontakt dahingehend optimiert werden, dass eine gute Haftung gewährleistet wurde und die Kontaktschicht keine Mikrorisse bildete. Zur Sicherstellung einer ausreichenden CIGS-Dotierung wurde als Rückkontakt noch eine Mo:Na-Schicht durch Kathodenzerstäubung aufgebracht, aus der dann während der CIGS-Bedampfung Natrium in den Absorber diffundierte. Die Menge des eindiffundierenden Natriums ließ sich über die Mo:Na-Schichtdicke einstellen, während die Substrattemperatur, die maßgeblich das Diffusionsverhalten beeinflusst, zwischen 440 °C und 480 °C gehalten wurde. Dadurch konnte eine homogene, flächenhafte und reproduzierbare Na-Dotierung erzielt werden.

Die thermische CIGS-Verdampfung der einzelnen Elemente auf 30 cm breite Polyimidfolie erfolgte aus Linearquellen von unten nach oben. In der Endausbaustufe der Anlage ist vorgesehen, dass alle Beschichtungsschritte vom Rückkontakt, dem Absorber, der Pufferschicht und dem transparenten Frontkontakt parallel und im gleichen Vakuum durchgeführt werden können. Zur Zeit ist die Pufferschichtabscheidung noch nicht in die R2R-Anlage integriert, sodass nach dem CIGS-Prozess die beschichtete Folie entnommen und in separaten Anlagen der Puffer sowie der Frontkontakt abgeschieden werden müssen. Für die R2R-Anlage wird derzeit eine Vakuum-Pufferschicht in einer externen Anlage entwickelt, die später in den R2R-Prozess integriert werden soll. Die Wirkungsgrade von Solarzellen mit R2R-Rückkontakt und R2R-Absorber konnten von anfänglich 3 % bereits auf deutlich über 10 % gesteigert werden.



// Roll-to-roll CIGS coating on polymer film

The focus of the work on the roll-to-roll (R2R) plant, which was constructed at the end of 2009, is to improve the Cu(In,Ga)Se₂ layer that is deposited using co-evaporation. In order to assess the absorber, the molybdenum rear contact had to be first of all optimised so that excellent bonding was assured without any micro cracks forming in the contact layer. To ensure that there is sufficient CIGS doping, an additional Mo:Na layer was applied as a rear contact by means of cathode sputtering, from which sodium then diffused into the absorber during the CIGS deposition. The amount of sodium that diffused into the absorber was determined by means of the Mo:Na layer thickness, while the substrate temperature that largely influences the diffusion behaviour was maintained between 440°C and 480°C. This enabled homogenous, extensive and reproducible Na-doping to be achieved.

The CIGS deposition of the individual elements on 30 cm-wide polyimide film is conducted from linear sources from below upwards. When the plant has reached its final development stage, it is planned to conduct all coating stages for the rear contact, absorber, buffer layer and transparent front contact in parallel and in the same vacuum. At the moment, the buffer layer deposition is not yet integrated into the R2R plant so that, once the CIGS process has been completed, the coated film has to be removed to enable the buffer and front contact to be deposited in separate plants. For the R2R plant, a vacuum buffer layer is currently being developed in an external plant that will be later integrated into the R2R process. It has been possible to increase the efficiency of solar cells with R2R rear contacts and R2R absorbers from an initial 3% to considerably more than 10%.

// Contact

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

// Monolithisch verschaltetes CIGS-Modul auf Polymerfolie.
// Monolithically connected CIGS module on a polymer film.

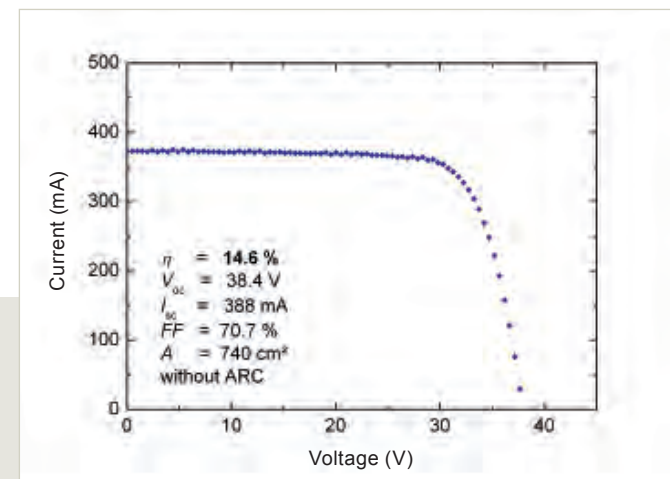
// Weiterentwicklung der CIGS-Technologie auf Glas

Further development of CIGS technology on glass

// Optimierung des Modulwirkungsgrads auf 30 x 30 cm²

Nachdem im Vorjahr ein Weltrekordwirkungsgrad von 20,3 % an Laborzellen realisiert werden konnte, lag 2011 der Fokus auf der weiteren Optimierung der industriennahen Technikumlinie am ZSW für die Herstellung von Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS)-Modulen mit einer Fläche von 30 x 30 cm². Zur Verbesserung des Modulwirkungsgrads wurden dazu alle Einzelprozessschritte (z. B. CIGS-Deposition, Strukturierung und Frontkontakt) weiterentwickelt sowie deren zeitliche Abfolge neu organisiert und abgestimmt. Mit den bisherigen Maßnahmen konnte der ZSW-interne Spitzenwirkungsgrad für Module der Größe 30 x 30 cm² auf 14,6 % weiter gesteigert werden (siehe Abb. unten links). Der bereits realisierte Kleinzellenwirkungsgrad von über 20 % lässt bei 30 x 30 cm² großen Modulen ein Wirkungsgradpotential von über 16 % erwarten. Auf der Fertigungsline eines Industriepartners konnte bereits ein Rekordwirkungsgrad von 15,1 % bezogen auf die Aperturfläche eines Moduls im Format 60 x 120 cm² erzielt werden [1].

Ein weiterer Fokus war die Weiterentwicklung der nasschemisch abgeschiedenen Zn(S,O)-Pufferschicht. Die Schichtwachstumsrate sollte so weit erhöht werden, dass eine industrielle Umsetzung mit der verfügbaren Anlagentechnologie mit festgesetzten Taktzeiten ohne Probleme erfolgen kann. Dazu wurde die Reaktionskinetik durch den Einsatz von Chelatkomplexen neu definiert. Es gelang eine Erhöhung der Depositionsrate um den Faktor drei gegenüber der bisherigen Prozessführung. Die Wachstumskinetik konnte so an die des Standard-CdS-Prozesses angepasst werden (siehe Abb. unten rechts).

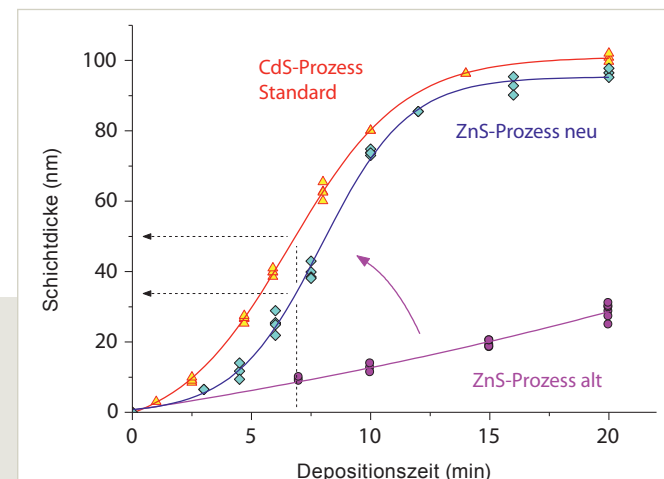


// IU-Kennlinie eines 30 x 30 cm² großen Rekordmoduls mit Standardschichtaufbau CIGS/CdS/ZnO/ZnO:Al aus der Modulbasislinie des ZSW.
// IV characteristic curve of a 30 x 30 cm² record module with a standard CIGS/CdS/ZnO/ZnO:Al layer structure from ZSW's basic module line.

// Optimisation of the efficiency of 30 x 30 cm² modules

After achieving a world record efficiency of 20.3% for laboratory cells in the previous year, the focus in 2011 was on further optimising the industrial-scale technical lab line at ZSW for manufacturing Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) modules with a size of 30 x 30 cm². To improve the module efficiency, all individual process stages (such as the CIGS deposition, structuring and front contact) were further developed and their chronological sequence newly organised and coordinated. The previous measures have enabled ZSW to further increase the peak efficiency for 30 x 30 cm² modules to 14.6% (see figure below left). Given the efficiencies already realised in excess of 20% for small cells, a potential efficiency of more than 16% can be expected for 30 x 30 cm² modules. A record efficiency of 15.1% relative to the aperture surface of a 60 x 120 cm² module has already been achieved on the production line of an industrial partner.

A further focus has been on further developing the wet-chemically deposited Zn(S,O) buffer layer. The intention was to increase the layer growth rate by such an extent that its industrial implementation can be achieved without any problems using the available plant technology and with fixed cycle times. For this purpose, the reaction kinetics was redefined by using chelate complexes. This enabled the deposition rate to be tripled relative to the previous process. The growth kinetics was therefore successfully adapted to that of the standard CdS process (see figure below right).



// Wachstumskinetik der Zn(S,O)-Pufferschicht im Vergleich zur CdS-Pufferschicht.
// Growth kinetics of the Zn(S,O) buffer layer in comparison with the CdS buffer layer.

Nach dem neuen Prozess abgeschiedene Zn(S,O)-Schichten wurden als Pufferschicht bei 30 x 30 cm² großen Modulen in der ZSW-Modullinie sowie bei 60 x 120 cm² großen Modulen in der Produktionslinie von einem Industriepartner eingesetzt. So konnte an unverkapselten 30 x 30 cm² großen Modulen ein vergleichbarer Wirkungsgrad gegenüber Standardmodulen mit CdS demonstriert werden. Auf der Modulgröße 60 x 120 cm² war sogar ein Rekordwirkungsgrad von 13,1 % auf der Aperturfläche möglich [2].

Der Einbau von Sauerstoff in der ZnS-Schicht erfolgt während der Abscheidung im chemischen Bad. Der Sauerstoffanteil in der Zn(S,O)-Pufferschicht beeinflusst stark ihre opto-elektronischen Eigenschaften und somit auch den Wirkungsgrad der CIGS-Solarzelle. Die zuverlässige Bestimmung des S/(S+O)-Verhältnisses in der Schicht ist daher sehr wichtig. Mit dem Verfahren der Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS) ist es prinzipiell möglich, die chemische Zusammensetzung von sehr dünnen Schichten zu bestimmen. Das Material der Probe wird hier mit einem fokussierten Ar⁺-Ionenstrahl beschossen und die herausgeschlagenen Neutralteilchen werden mit einem niederenergetischen Elektronenstrahl ionisiert und anschließend in ein Massenspektrometer gelenkt. Durch kontinuierliches Sputtern werden Tiefenprofile erzeugt. Zur Bestimmung der SNMS-Empfindlichkeitsfaktoren für die Elemente Zn, O und S wurden Analysen an stöchiometrischen ZnO- und ZnS-Einkristallen durchgeführt. Aufgrund der vielfältigen Überlagerung der Isotope von Zn, O und S musste eine spezielle Auswertprozedur entwickelt werden. Hiermit konnten die als Puffer eingesetzten Zn(S,O)-Schichten quantifiziert werden. Die Abbildung unten zeigt das SNMS-Tiefenprofil einer 100 nm dicken ZnS-Schicht auf einer CIGS-Funktionsschicht mit einem Sauerstoffanteil von rund 20 %.

Referenzen

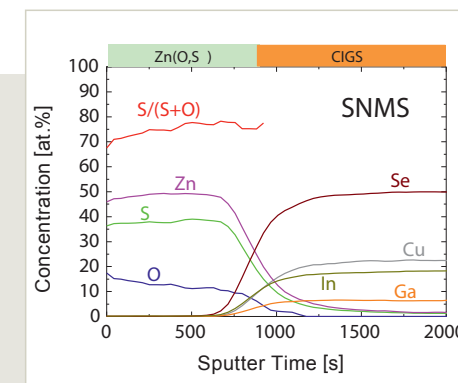
- [1] Pressemitteilung, Manz AG, Reutlingen 05.09.2011 (www.manz.com/de/media/news/manz-mit-dreifach-weltrekord-in-der-cigs-technologie-337)
[2] Hariskos et al., "New reaction kinetics for a high-rate chemical bath deposition of the Zn(S,O) buffer layer for Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells", Prog. Photovolt: Res. Appl. (2011), Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/pip.1244

Zn(S,O) layers deposited according to the new process have been utilised as buffer layers in 30 x 30 cm² modules in ZSW's module line as well as in 60 x 120 cm² modules in the production line of an industrial partner. This has enabled efficiencies comparable with standard modules with CdS to be achieved on non-encapsulated 30 x 30 cm² modules. A record efficiency of 13.1% relative to the aperture surface area was even achieved for the 60 x 120 cm² module size [2].

Oxygen is integrated into the ZnS layer during the deposition in the chemical bath. The oxygen content in the Zn(S,O) buffer layer considerably influences its opto-electronic properties and thus also the efficiency of the CIGS solar cells. It is therefore very important to reliably determine the S/(S+O) ratio in the layer. Using the secondary neutral mass spectrometry (SNMS) process, it is possible, in principle, to determine the chemical composition of very thin layers. The sample material is bombarded with a focussed Ar⁺ ion beam and the sputtered neutral particles are ionised with a low-energetic electron beam and then directed into a mass spectrometer. The continual sputtering generates depth profiles. Analyses of stoichiometric ZnO and ZnS monocrystals were conducted to determine the SNMS sensitivity factors for the elements Zn, O and S. The diverse overlapping of Zn, O and S isotopes meant that a special evaluation procedure had to be developed that enabled the Zn(S,O) layers used as a buffer to be quantified. The figure below shows the SNMS depth profile for a 100 nm-thick ZnS layer on a CIGS function layer. It has an oxygen content of around 20%.

References

- [1] Press release, Manz AG, Reutlingen 5 September 2011 (www.manz.com/de/media/news/manz-mit-dreifach-weltrekord-in-der-cigs-technologie-337)
[2] Hariskos et al., "New reaction kinetics for a high-rate chemical bath deposition of the Zn(S,O) buffer layer for Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells", Prog. Photovolt: Res. Appl. (2011), Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/pip.1244



// Quantifiziertes Tiefenprofil mittels Sekundärneutralteilchen-Massenspektrometrie (SNMS) an einer 100 nm dicken Zn(S,O)-Pufferschicht, die im chemischen Bad auf einer CIGS-Schicht abgeschieden wurde.
// Depth profile quantified using secondary neutral mass spectrometry (SNMS) on a 100 nm thick Zn(S,O) buffer layer that was deposited on a CIGS layer in the chemical bath.

// Contact

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Im Fachgebiet MSA werden Untersuchungen zu Leistung und Ertrag sowie zur Langzeitstabilität von PV-Modulen und -Systemen durchgeführt. Für die Charakterisierung der Modulstabilität werden Resultate aus beschleunigten Alterungstests im Labor mit Degradationseffekten unter Freifeld-Betriebsbedingungen korreliert. Eigene Verfahren zur Analyse von Freilandmessreihen dektieren auch im Schwachlichtbereich kleinste Degradationseffekte. Die bei allen Modultechnologien beobachtbare potenzialinduzierte Leistungsdegradation (PID), die in PV-Anlagen auftreten kann, wird jetzt durch Leckstrommessungen in der Klimakammer und im Freifeld untersucht. Das Modultestlabor Solab bietet hier spezielles Know-how im Bereich der Dünnschicht-Technologien, aber auch für kristalline PV-module. Die Testmöglichkeiten wurden durch die Inbetriebnahme eines Freifeld-Teststandes in Spanien wesentlich erweitert. Weitere Arbeitsgebiete sind die Optimierung der Netzeinbindung von PV-Systemen in Verbindung mit elektrochemischen Speichern, Feldtests von PV-Batteriesystemen (siehe Bericht rechts) und die Gebäudeintegration von PV-Modulen.

Zur immer häufiger nachgefragten Beratungskompetenz des Fachgebiets gehören Prüfungen („Due Diligence“) von geplanten und bestehenden Megawatt-PV-Anlagen im Auftrag finanzierender Banken, Projektierer oder Betreiber. Darüber hinaus werden Standortbewertungen, Auslegungen von PV-Systemen, Ertragsgutachten und die Qualitätskontrolle von PV-Anlagen als kundenspezifische Dienstleistung angeboten.

// Our main focus

The MSA research department carries out studies on the output, yield and long-term stability of photovoltaic modules and systems. In order to characterise the module stability, results from accelerated ageing tests in the laboratory are correlated with degradation effects under outdoor operating conditions. ZSW's own special processes for analysing field measurement series also detect the tiniest degradation effects in the low-light area. The potential-induced degradation (PID) observable with all module technologies, which occurs in PV systems, can now be investigated using leakage current measurements in climate chambers and outdoors. The Solab module test laboratory is able to provide special expertise in this respect, not just for thin-film technologies but also crystalline PV modules. The testing possibilities have been considerably expanded by the establishment of an outdoor testing facility in Spain. Further work areas include optimising the integration of photovoltaic systems into the power grid in conjunction with electrochemical storage systems, field tests on PV battery systems (see report right) and the integration of photovoltaic modules in buildings.

The research department's consultancy expertise, increasingly in demand, includes testing planned and existing MW PV systems (due diligence) on behalf of banks, project developers and operators. In addition, the research department also offers customer-specific services in the form of site assessments, designs for photovoltaic systems, yield reports and quality checks on photovoltaic systems.

// Contact

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

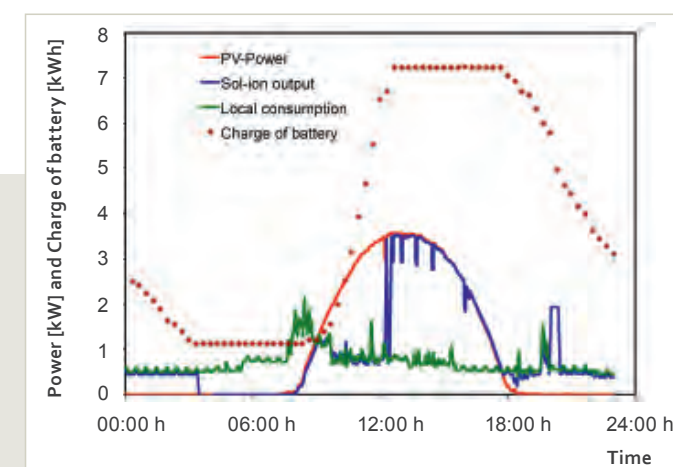
// Solarstrom dezentral speichern

Decentralised storage of solar power

// Netzeinbindung von Photovoltaiksystemen

Solarstrom aus PV-Anlagen wird in Deutschland zu einem großen Anteil ins Niederspannungsnetz eingespeist. Das Maximum der Einspeisung liegt in der Mittagszeit und erzeugt dann in Regionen mit hoher PV-Anlagendichte Spannungsüberhöhungen im Verteilnetz. Ein wesentlicher Anteil des häuslichen Stromverbrauchs entsteht dagegen in den Abendstunden zwischen 18 und 22 Uhr. Als wirksames Mittel, um den Eigenverbrauch des Solarstroms zu erhöhen, untersucht das ZSW die Wirkung von dezentralen Batteriespeichern und die zeitliche Verschiebung von großen Lasten, etwa von lokalen Wärmepumpen für die Gebäudeheizung. Zudem werden Algorithmen erarbeitet, um die Verteilnetze zu entlasten. Die Simulationen beschreiben die Potenziale von PV-Speichersystemen und beleuchten die Wirtschaftlichkeit im Zusammenhang mit dem Eigenstromverbrauch.

Das ZSW ist im Rahmen des deutsch-französischen Forschungsvorhabens „Sol-ion“ an der Auswertung von PV-Speichersystemen, ihrem Betrieb und der Lebensdaueranalyse ihrer Batterietechnik beteiligt. Die beispielhaften Messkurven des im Solar-Testfeld Widderstall aufgebauten Systems (siehe Abb. unten) zeigen den ansteigenden Energieinhalt der Batterie (braune Kurve) am Morgen, gespeist aus jener PV-Leistung (rot), die den lokalen Verbrauch (grün) übersteigt. Die Entladung der Batterie in den Abend- und Nachtstunden gewährleistet, dass die Ausgangsleistung des PV-Speichersystems (blau) auch in dieser Zeit den lokalen Verbrauch decken kann. Nur in den frühen Morgenstunden wird Energie aus dem Netz bezogen. Der im Beispiel gewählte PV-Generator aus 21 Solarmodulen auf einem Doppel-Carport liefert rund 4.500 kWh/a und deckt damit den Verbrauch für Haushaltsgeräte in einem typischen Vierpersonenhaushalt in Deutschland.



// Integrating photovoltaic systems into the power grid

In Germany, the solar power from PV systems is mostly fed into the low-voltage grid. Most of the electricity is fed into the grid at midday and, in regions with a high density of PV systems, this creates excess voltage in the distribution network. However, a large proportion of the domestic electricity consumption occurs during the evening between 6 and 10 pm. ZSW is therefore investigating the effect of decentralised battery storage systems and the chronological shifting of large loads, such as local heat pumps for heating buildings, as an effective means for increasing the self-consumption of solar power. In addition, algorithms are being developed to relieve the distribution networks. The simulations describe the potential provided by PV storage systems and demonstrate their cost-effectiveness in relation to self-consumption.

As part of the German-French Sol-ion research project, ZSW is not only evaluating PV storage systems and their operation but is also analysing the service life of the battery technology. The example measurement curves of the system constructed at the Widderstall solar testing facility (see fig. below) show the increasing energy content of the battery (brown curve) during the morning, fed from the PV output (red) that exceeds the local consumption (green). The discharging of the battery during the evening and night ensures that the output power of the PV storage system (blue) can also cover local consumption during this time. Energy is only drawn from the grid during the early morning hours. The PV generator selected in the example, which consists of 21 solar modules on a double carport, supplies approximately 4,500 kWh/a and therefore meets the consumption requirements for domestic appliances in a typical four-person household in Germany.

// Abb. oben: Solargenerator für das PV-Speichersystem Sol-ion auf dem Solar-Testfeld Widderstall mit Messprofilen vom 4.10.2011, einem wolkenlosen Tag.
// Fig. above: Solar generator for the Sol-ion PV storage system at the Widderstall solar testing facility with measurement profiles from 4 October 2011, a cloudless day.

// Contact

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



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

// 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 Energie über die Erzeugung von Wasserstoff bzw. eines wasserstoffreichen Gases hocheffizient zu verstromen

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

REG-Schwerpunktt Themen sind:

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

// Our main focus

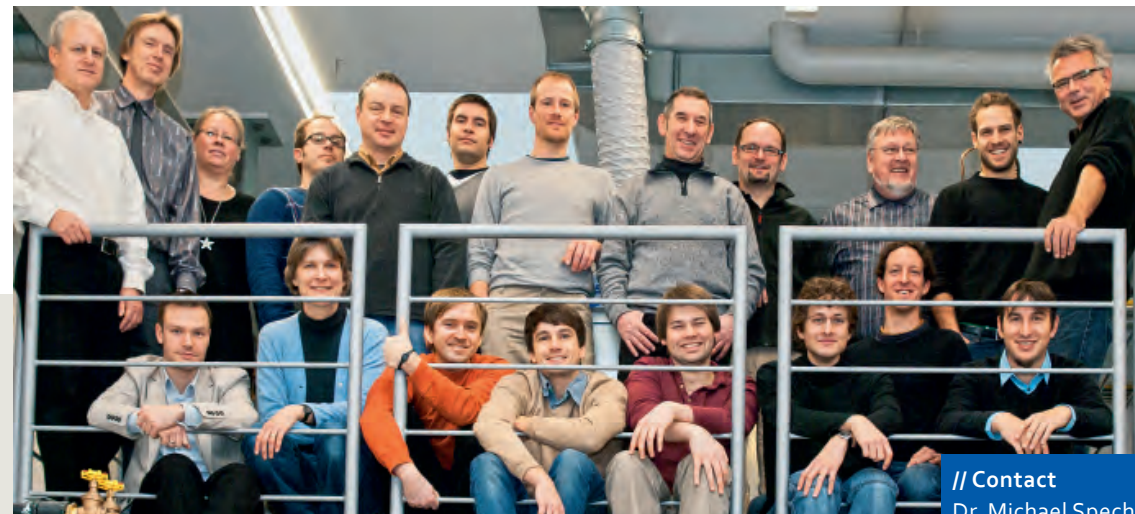
Our goals in the production of renewable fuels can be summarised as follows:

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

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

REG focuses on:

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



// Contact

Dr. Michael Specht
E-mail: michael.specht@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-252

// Speicherung erneuerbarer Energien im Erdgasnetz

Storing renewable energies in the natural gas grid

// Power-to-Gas

Ziel eines zukünftigen Energiesystems ist eine nachhaltige Vollversorgung aus erneuerbaren Ressourcen. Viele erneuerbare Energien wie die Windkraft oder PV 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. Die derzeit durch Pumpspeicherkraftwerke vorhandene Speicherkapazität beträgt in Deutschland 0,04 TWh. Abschätzungen des zukünftigen Speicherbedarfs bei einer zu 100% erneuerbaren Stromversorgung liegen im zweistelligen TWh-Bereich. Das am ZSW zusammen mit den Partnern Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik und SolarFuel GmbH entwickelte P2G® (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. Durch die Umwandlung von Strom zu Gas können zur Stromspeicherung die im Erdgasnetz vorhandenen Unterspeicher mit einer Kapazität von > 200 TWh mitgenutzt werden.

Im Fachgebiet REG erfolgt das Basic Engineering für P2G®-Anlagen und die Anpassung an spezifische Anforderungsprofile. 2011 erfolgte der Betrieb einer containerintegrierten Anlage an Standorten mit verschiedenen CO₂-Quellen. Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes „Power-to-Gas“ (0325275A) wird 2012 eine weitere, um den Faktor zehn größere Versuchsanlage mit 250 kW_e am ZSW in Betrieb gehen. Im Vordergrund stehen hier die Prozessoptimierung für die dynamische Betriebsweise, eine Reduktion der Anlagenkosten und Fragestellungen beim Scale-up für zukünftige Anlagen im MW-Bereich. Die Evaluierung des zukünftigen Speicherbedarfs unter Berücksichtigung verschiedener Entwicklungsszenarien ist ebenfalls Gegenstand der Forschungsarbeiten.

// Power-to-Gas

Future energy systems are aimed at completely supplying energy from renewable resources in a sustained manner. However, many renewables such as wind energy or PV are highly fluctuating. If the end energies, electricity, heat and fuel, are to continue to be available at any time and without limitations in their use, this requires the use of energy storage. The currently available storage capacity provided by pumped storage plants in Germany amounts to 0.04 TWh. It is estimated that the future storage requirement given a 100% electricity provision with renewable energy would lie in the double-digit TWh range. The P2G® (Power-to-Gas) concept, which ZSW has jointly developed together with the partners Fraunhofer-Institute for Wind Energy and Energy System Technology and SolarFuel GmbH, plans to convert “excess” electricity into hydrogen by means of electrolysis, which is then converted into methane in a subsequent synthesis step (methanisation) by combining the hydrogen with CO₂. Possible CO₂ sources include CO₂ from biogas plants, bioethanol production, power plant processes and the chemical industry. Converting electricity into gas will enable the existing underground storage systems in the natural gas network, which have a capacity > 200 TWh, to be used for storing electricity.

The basic engineering for the P2G® plants and their adaptation to specific requirement profiles has been conducted within the REG research department. In 2011, a container-integrated plant went into operation at various sites with different types of CO₂ sources. As part of the BMU-funded “Power-to-Gas” project (0325275A), a further test plant will go into operation in 2012. Located at ZSW, this will be ten times larger with an input power of 250 kW_e. The focus here is on optimising the dynamic operation process, reducing the plant costs and investigating how the system can be scaled up for future plants in the MW range. The research work is also evaluating the future storage requirements, taking various development scenarios into consideration.

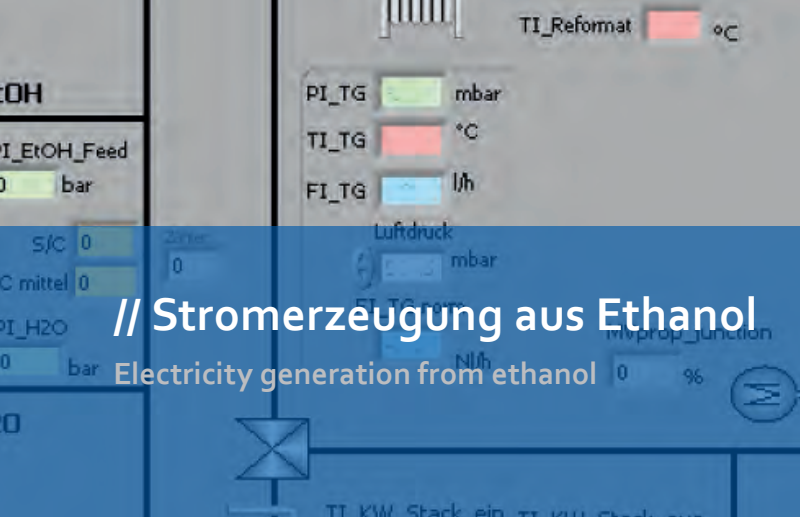
// Contact

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

// Dr. Michael Specht

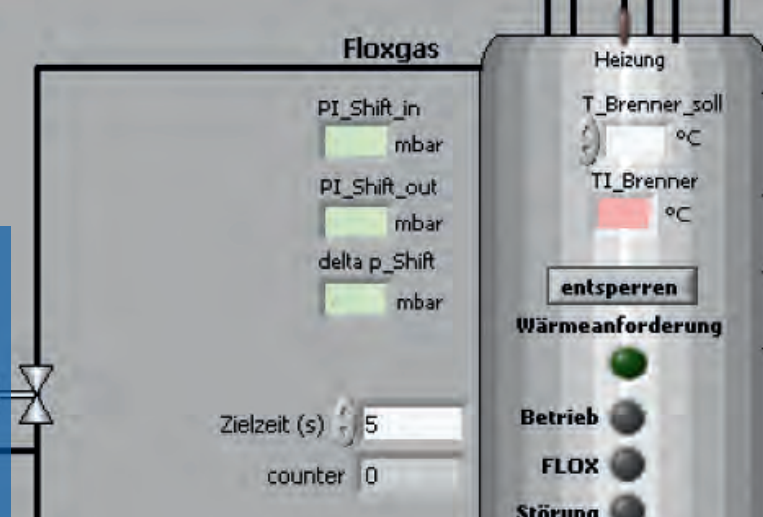
Ziel des Fachgebiets REG ist es, erneuerbare Energie in Form chemischer Energieträger zu speichern.

The aim of the REG research department is to store renewable energy in the form of chemical energy carriers.



// Stromerzeugung aus Ethanol

Electricity generation from ethanol



// Biogasaufbereitung mit Membrantechnologie

Biogas conditioning with membrane technology

// Ethanol-PEM-Brennstoffzellensystem zur dezentralen Stromversorgung

Ziel des durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Projektes ist die Entwicklung und Erprobung eines PEM-Brennstoffzellensystems zur dezentralen Stromversorgung im Leistungsbereich 1 kW_e , das mit Bioethanol als Brennstoff versorgt wird. Potenzielle Einsatzfelder existieren in der netzunabhängigen stationären Stromversorgung, aber auch in Anwendungen für die Bordstromversorgung von Fahrzeugen, z. B. im Freizeitsektor (Camping, Caravan). Im Vergleich zu bereits in der Entwicklung befindlichen Wasserstoff- bzw. Flüssiggassystemen weist Ethanol insbesondere hinsichtlich Speicherdichte, Verfügbarkeit (Spiritus) und regenerativer Erzeugbarkeit Vorteile auf. Das System ist mit einer Lithium-Ionen-Batterie hybridisiert.

Für den wesentlichen Verfahrensschritt der Ethanol-Dampfreformierung wurde in Kooperation mit einem Unternehmen ein Kompaktreformer mit integrierter Feinreinigung entwickelt. Der Reformierungsprozess basiert auf der nahezu schadstofffreien FLOX®-Verbrennungstechnologie. Im Gesamtsystem ist ein geschlossener Wasserkreislauf realisiert, sodass der Reformer mit rückgewonnenem Wasser gespeist werden kann und der Tank ausschließlich mit Ethanol bzw. Spiritus befüllt werden muss. Stackseitig wurde ein PEM-Brennstoffzellenstack aus eigener Entwicklung integriert.



Im Herbst 2011 wurde das mit Lithium-Ionen-Batterien hybridisierte Gesamtsystem im Beisein des projektbegleitenden Industrieausschusses erfolgreich in Betrieb genommen und volle Funktionalität demonstriert.

Die verbleibende Projektlaufzeit soll insbesondere für die Validierung und Weiterentwicklung von Betriebsführungsstrategien sowie die Optimierung des Systempackagings genutzt werden. Die Forschungsarbeiten basieren auf der Expertise dreier Fachgebiete des ZSW: Brennstoffreformierung und Systemintegration (REG), Brennstoffzellenentwicklung (ECB) sowie Akkumulatoren (ECA).

// Ethanol PEM fuel cell system for standalone power supply

PEM fuel cell systems offer high potential for efficient and clean heat and power generation. A bio-ethanol based system in the power range of 1 kW_e has been developed for power supply in standalone stationary or mobile applications. Compared to H_2 or LPG systems, the key benefits of renewable bio-ethanol are a high storage density and the availability of a renewable fuel. The main parts of the system are an ethanol steam reformer, which has been developed in cooperation with an industrial partner, a PEM fuel cell stack of the Ulmer Brennstoffzellen Manufaktur (UBzM) and a lithium-ion battery providing a peak power of approx. 2 kW_e . Electrical efficiencies $> 29\%$ (net) have been demonstrated resulting in an ethanol consumption of approx. 0.5 litres per hour at nominal load of 1 kW_e .

// PEM-Brennstoffzellensystem zur dezentralen Stromversorgung im Leistungsbereich 1 kW_e auf Basis von Bioethanol.
// Bio-ethanol based PEM fuel cell system for standalone power supply in the power range 1 kW_e .

// Contact

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

// Biogasaufbereitung zu Biomethan-Kraftstoff

In einem Verbundforschungsvorhaben mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie wird untersucht, wie Biogas möglichst effizient aus lignocellulosearmen Abfall- und Mikroalgenreststoffen gewonnen werden kann. In einer Demonstrationsanlage auf dem Gelände des EnBW-Heizkraftwerkes in Stuttgart-Gaisburg sollen Obst- und Gemüsereste aus dem nahegelegenen Stuttgarter Großmarkt zu Biogas und nachfolgend zu Biomethan-Kraftstoff veredelt werden. Es ist geplant, das Gas als Kraftstoff in Erdgas-Versuchsfahrzeugen zu testen.

Das Fachgebiet REG entwickelt für den zentralen Verfahrensschritt der Biogasaufbereitung zu Biomethan mit Kraftstoffqualität eine containerintegrierte Aufbereitungsanlage basierend auf der Membrantechnologie. Der Container ist in einen Arbeitsraum mit den Hauptkomponenten Verdichterstation und Membrananlage sowie einen gasdicht abgetrennten Steuerungs- und Überwachungsbereich untergliedert. Die Anlage ist für einen Rohbiogasstrom von $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ausgelegt und bereitet diesen gemäß DIN 51624 zu einem biogenen Kraftstoff für erdgastaugliche Kraftfahrzeuge auf. Durch Einsatz der Membrantechnologie können unterschiedliche DIN-konforme Gasbeschaffenheiten ohne die Notwendigkeit einer prozesstechnischen Adaption erzeugt und der Betankungseinrichtung übergeben werden.

Die Membran-Aufbereitungsanlage wurde im Dezember 2011 am ZSW erfolgreich in Betrieb genommen. Nach abgeschlossener Parametrierung der Anlagen wird die Membranaufbereitungsanlage Anfang 2012 zum Kraftwerk Gaisburg transportiert, wo sie im Gesamtanlagenkomplex des Forschungsprojekts ihre eigentliche Funktion aufnehmen wird.

// Abb. oben: Inbetriebnahme der Membran-Aufbereitungsanlage am ZSW gemeinsam mit den Projektverantwortlichen der EnBW.
// Fig. above: Commissioning the membrane upgrading plant at ZSW together with the project partners from EnBW.

// Upgrading biogas to form biomethane fuel

The joint research project, which is being conducted together with partners from science and industry, is investigating how biogas can be generated as efficiently as possible from low-lignocellulosic waste and micro-algae biomass. In a demonstration plant at the EnBW heating plant in Stuttgart-Gaisburg, fruit and vegetable waste from Stuttgart's neighbouring wholesale market is fermented into biogas and then upgraded to form biomethane fuel. It is planned to use the gas to fuel natural gas test vehicles.

The REG research department is developing a container-integrated upgrading plant based on membrane technology that will be used for the central process stage in upgrading the biogas to form fuel-quality biomethane. The container is divided up into a workspace with the compressor station and membrane plant as the main components, along with a separate, gas-tight control and monitoring area. The plant has been designed to achieve a raw biogas flow of $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$ and upgrades this in accordance with DIN 51624 to form a biogenic fuel for natural gas-fuelled vehicles. The use of the membrane technology enables different DIN-compliant gas compositions to be generated without having to adapt the process, which can then be transferred to the fuelling facility.

The membrane upgrading plant at ZSW was successfully launched in December 2011. Once the system parameterisation has been completed, the membrane upgrading plant will be transported to the Gaisburg power plant in spring 2012 where it will begin its actual work as part of the overall plant complex developed for the research project.

// Contact

Bernd Stürmer
E-mail: bernd.stuermer@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-249

// 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. 2011 wurde mit der Inbetriebnahme einer Forschungs-Fertigungslinie für die Herstellung von Flach- sowie Rundzellen ein großer Schritt in ein neues Kompetenzfeld erfolgreich umgesetzt, der es erlaubt, neue Zellchemie in Standardzellen zu verifizieren sowie neuartige Komponenten und 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 oder 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. Das internationale Team besteht aus Ingenieuren und Technikern aus Chemie, Physik und Materialwissenschaften und forscht für den schnellen Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung praxisrelevanter neuer Energiespeichersysteme.

// 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 deep 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 for manufacturing flat and cylindrical cells in 2011, 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 post-mortem analyses, not just for damage analyses but also for assessing new cells. This expertise is essential for understanding ageing processes and potential system weak points and for optimising the material. Our international of 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

// Zelltechnologie für Lithium-Ionen-Batterien

Cell technology for lithium-ion batteries

// Prozesstechnologie Lithium-Ionen-Zellen

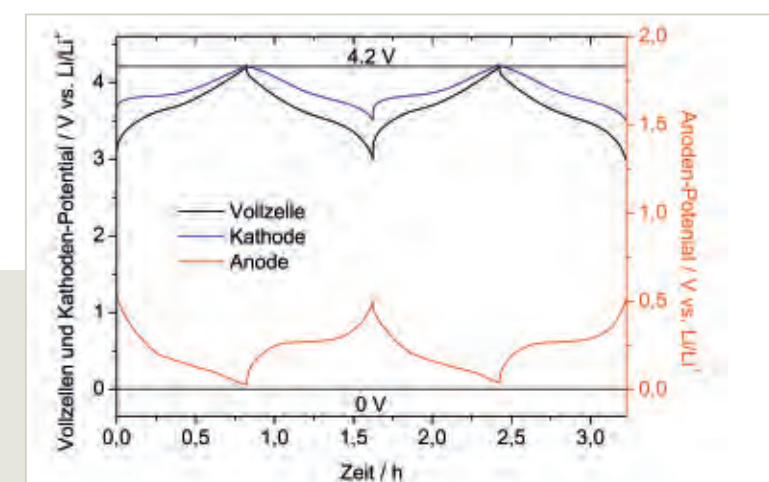
Mit dem Bezug unseres neuen Gebäudes eLaB wurde der Bereich Zellfertigungstechnologie maßgeblich ausgebaut. Die Elektrodenfertigung wurde um eine neue Elektrodenbeschichtungsanlage erweitert, die mehrere Auftragstechniken sowie eine lange Trocknungsstrecke bei hochpräzisem Bandlauf bietet. Ein neuer Kalandar ermöglicht die Endverdichtung der Elektroden auf Produktionsniveau. Des Weiteren konnte auch eine Stapel-Wickelmaschine zur Herstellung von Pouchzellen angeschafft werden. Im Technikum wurden diverse Pouchzellen, darunter eine 5-Ah-Zelle, sowie gestapelte Pouchzellen aus bis zu 30 Elektroden hergestellt. Dazu wurden Rundzellen im Format 18650 hergestellt, die bereits mehrere tausend Zyklen Lebensdauer zeigten.

Des Weiteren wurden Methoden zur Erforschung der Vorgänge in Vollzellen entwickelt. In Lithium-Ionen-Vollzellen kann das Zusammenwirken verschiedener Materialien im realen Zell-Leben erforscht werden. Daher werden diese Zellen häufig mit dem Ziel gebaut, die Eignung neuer Materialien sowie die auftretenden Vorgänge in den Zellen zu untersuchen. Der Einbau einer Lithium-Referenzelektrode bietet in Pouch- und in Rundzellen die Möglichkeit, die Potenziale der einzelnen Elektroden während der Zyklierung zu verfolgen und das Formationsverhalten, die Balancierung und die Alterung zu untersuchen. Die Innentemperatur kann in Pouch- und Rundzellen anhand von Thermoelementen erfasst werden. Mittels dilatometrischer Volumenbestimmung und in-situ-Gasanalyse können das Schwellverhalten der Elektroden und das entstehende Gas während der Zyklierung untersucht werden.

// Process technology used for lithium-ion cells

The move to the new eLaB building has considerably enlarged the cell production technology area. The electrode production has been expanded with a new electrode coating machine that offers several coating technologies as well as a long drying line with a high-precision belt track. A new calendar enables the electrodes to be compacted to production level. A stack winder for manufacturing pouch cells has also been procured. In the technical lab, diverse pouch cells have been manufactured, including a 5-Ah cell and stacked pouch cells with up to 30 electrodes. In addition, cylindrical cells with the 18650 format have been produced with a service life of several thousand cycles.

Methods for researching the processes in full cells have also been developed. In lithium-ion full cells, for example, it is possible to research the interaction of various materials during the real cell life. For this reason, these cells are frequently built with the aim of investigating the suitability of new materials and the processes that occur in the cells. The use of lithium reference electrodes in pouch and cylindrical cells makes it possible to monitor the potentials of the individual electrodes during the cyclisation and to study the behaviour of the formation, balancing and state of health. The internal temperature in pouch and cylindrical cells can be recorded using thermo elements. By dilatometrically determining the volume and using in-situ gas analysis, it is possible to investigate the swelling behaviour of the electrodes and the resulting gas during the cyclisation.



// Galvanostatische Zyklierung einer Pouchzelle (NCM, Graphit) mit Referenzelektrode.
// Galvanostatic cyclisation of a pouch cell (NCM, graphite) with a reference electrode.

// Contact

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

// Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien

Active materials for lithium-ion batteries

// APPLES

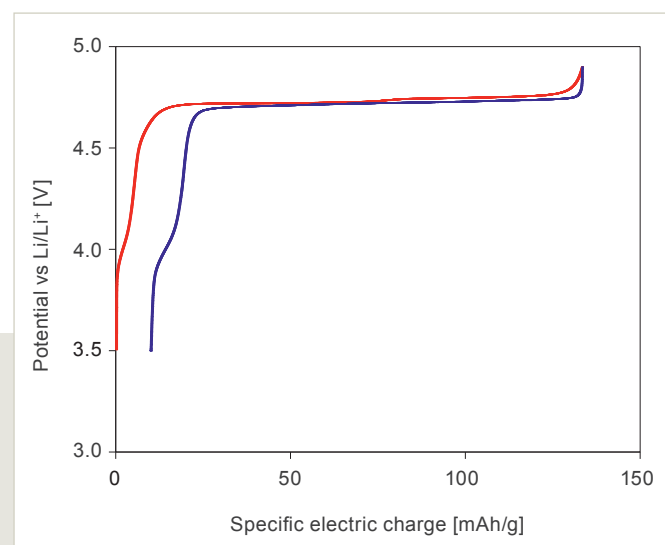
„APPLES“ steht für Advanced high Performance Polymer Lithium Battery for Electrochemical Storage. Projektziel ist die Entwicklung eines neuartigen Hochenergie-Batterietyps mit Hochvolt-spinellkathode, Polymerelektrolyt und Zinn-Kohlenstoff-Komposit-Anode. Das Projektteam ist international aufgestellt, Arbeitsgruppen aus Deutschland, Italien und Schweden sind beteiligt. Wesentliche Aufgaben des ZSW sind die Herstellung neuartiger Hochvoltspinelle, die Elektrodenentwicklung sowie der Bau von Pouchzellen mit 2 bis 3 Ah im vorindustriellen Maßstab.

Im ersten Projektabschnitt gelang es, in kontinuierlicher Syntheseführung ein $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ im Maßstab > 100 g herzustellen. Das Material hat sphärische Morphologie und entspricht in seiner Partikelgrößen- und Formverteilung kommerziell eingesetzten Schichtoxiden. Die Optimierung der Syntheseparameter erfolgte unter Einsatz statistischer Versuchsplanung. Das Material zeigt sehr gute Speicherefähigkeit bei gleichzeitig guter Belastbarkeit. Erste Beschichtungsversuche in vorindustriellem Maßstab verliefen erfolgreich.

// APPLES

“APPLES” stands for Advanced High Performance Polymer Lithium Battery for Electrochemical Storage. The aim of the project is to develop a new type of high-energy battery with a high-voltage spinel cathode, polymer electrolyte and zinc-carbon composite anode. The project team is international in scope with working groups from Germany, Italy and Sweden. ZSW’s main tasks include producing innovative high-voltage spinels, developing electrodes and constructing pouch cells with 2 to 3 Ah at a pre-industrial scale.

In the first phase of the project, $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ was successfully produced using a continuous synthesis process at a scale greater than 100 g. The material has a spherical morphology and, in terms of its particle size and form distribution, corresponds to commercially used layered oxides. The synthesis parameters were optimised by means of statistically designed experiments. The material shows very good storage abilities and excellent durability. Initial coating tests have been successfully conducted at a pre-industrial scale.



// Potenzialverlauf des Hochvoltspinells.
// Potential characteristic of the high-voltage spinel.



// Materialsynthesereaktor im Kg-Maßstab.
// Material synthesis reactor in kg-scale.

// Contact

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

// Materialcharakterisierung

Characterisation of materials

// Elektrolytforschung: Projekte Li-Redox und EiSiBatt

Die Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien ist heute ein zentrales Thema. Sie wird durch jede einzelne Komponente in der Zelle und durch deren Zusammenspiel bestimmt. In zwei öffentlich geförderten Verbundprojekten mit namhaften Industriepartnern werden neue Elektrolytformulierungen erforscht, die eine höhere intrinsische Sicherheit unter Missbrauchsbedingungen versprechen.

Das Projekt Li-Redox (gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) ist der Entwicklung von Redox-Shuttle-Elektrolytadditiven für 4-V-Systeme gewidmet. Redox-Shuttle-Additive ermöglichen einen reversiblen Schutz vor Überladung. Die Zelle bleibt dabei auch nach Aktivierung des Überladeschutzmechanismus einsatzfähig.

Im Rahmen des Projektes EiSiBatt (gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft) werden neue Elektrolytformulierungen für eigensichere $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}/\text{LiFePO}_4$ -Zellen entwickelt, die sich durch niedrige Entflammbarkeit und erhöhte Sicherheit unter Überladebedingungen auszeichnen.

Im Jahr 2011 wurde am ZSW das Portfolio an Charakterisierungsmethoden für Elektrolyte massiv ausgebaut. Mit neuen Instrumenten zur Bestimmung von elektrischer Leitfähigkeit, Dichte, Viskosität, Dampfdruck und Flammpunkt, neuen elektroanalytischen Methoden und ergänzender Analytik wie UV-Vis/IR/Raman-Spektroskopie steht ein leistungsfähiges Elektrolytlabor für die Erforschung neuer Elektrolytkomponenten zur Verfügung.

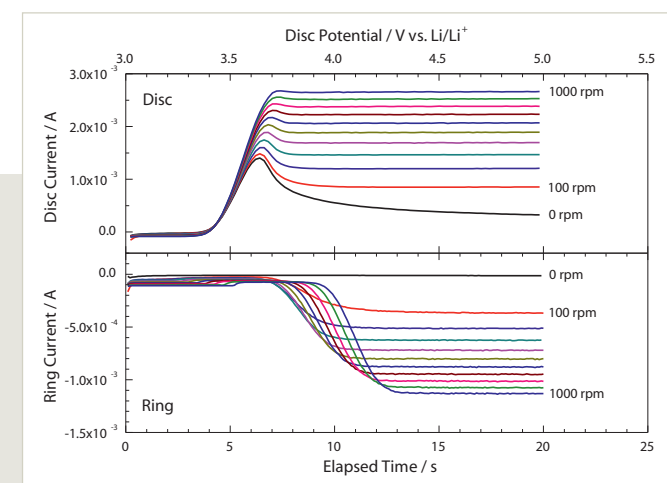
// Electrolyte research: Li-Redox and EiSiBatt projects

The safety of Li-Ion batteries has become a central issue. It is determined by each single component in the cell and through their interaction. In two publicly funded joint projects with renowned industrial partners, new electrolyte formulations are being researched that promise greater intrinsic safety under abuse conditions.

The Li-Redox project (funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)) is aimed at developing redox shuttle electrolyte additives for 4-V systems. Redox shuttle additives enable reversible protection against overcharging, whereby the cell can still be used once the overloading protection mechanism has been activated.

As part of the EiSiBatt project (funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWii)), new electrolyte formulations are being developed for intrinsically safe $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}/\text{LiFePO}_4$ cells that are characterised by their low flammability and enhanced safety under overcharging conditions.

In 2011, ZSW considerably expanded its range of methods for characterising electrolytes. A high-performing electrolyte laboratory for determining new electrolyte components is now available that includes new instruments for determining the electrical conductivity, density, viscosity, vapour pressure and flame point and also provides new electro-analytical methods and supplementary analysis such as UV-Vis/IR/Raman spectroscopy.



// Charakterisierung eines Redox-Shuttle-Elektrolytadditivs mittels rotierender Ring-Scheiben-Elektrode. (Redox-Potenzial des Additivs: 3,6 V vs. Li/Li^+ . Konzentration: 0,05 mol/L in 1 M LiPF_6 / EC:DMC (1:1), Ring-Potenzial: 3,0 V vs. Li/Li^+).
// Characterisation of a redox shuttle electrolyte additive using a rotating ring-disk electrode. (Redox potential of the additive: 3.6 V vs. Li/Li^+ . Concentration: 0.05 mol/L in 1 M LiPF_6 / EC:DMC (1:1). Ring-potential: 3.0 V vs. Li/Li^+).

// Contact

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

// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Schwerpunkt der Arbeiten im Fachgebiet ECA ist die Untersuchung und Weiterentwicklung von Energiespeichersystemen. Damit Akkumulatoren bzw. Batterien auch bei schwierigsten Bedingungen und Voraussetzungen sicher und leistungsfähig sind, stehen deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die Ermittlung der qualitativen Eigenschaften der Akkumulatoren und die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung sowie in Unfallsituationen im Mittelpunkt unserer Arbeit. In „Abuse Tests“ wird die Widerstandsfähigkeit der Akkumulatoren gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienungen bis aufs Äußerste getestet und somit die Reaktionen sowie das eventuell entstehende Gefahrenpotenzial bei extremen Schädigungen ermittelt.

Zu unseren zentralen Aufgaben im Bereich der Batteriesystemtechnik gehören die Bestimmungsmöglichkeiten des Systemzustandes (Ladezustand, Alterung), die Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit, die thermische und elektrische Modellierung sowie die Simulation von Batterien und Batteriekomponenten. Wir decken ein breites Spektrum an verschiedenen Tests und Simulationen ab. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung und Optimierung bestimmter Akkumulatoren und deren Betriebsweise für verschiedene Anwendungen ein. Dazu zählen vor allem der Einsatz zur Netzstützung bzw. Bereitstellung von Regelleistung, zur Zwischenspeicherung von Strom aus fluktuierenden Erzeugern wie der PV oder in portablen Geräten genauso wie in elektrifizierten Antriebssträngen.

// Our main focus

The department's main task is to investigate and further develop energy storage systems. In order that accumulators and batteries are also safe and powerful under the most extreme conditions and requirements, our work focuses on characterising them under various operating conditions, determining the qualitative properties of the accumulators and investigating their behaviour when operating errors or accident situations occur. In abuse tests, the resistance of accumulators relative to various abuse conditions and operating errors are tested to the extreme, thus enabling the reactions and potential risks to be determined when there is extreme damage.

Our central tasks in the field of battery system technology include methods for determining the system states (state of charge and state of health), forecasting the system performance, thermal and electrical modelling as well as simulating batteries and battery components. We are able to provide a broad spectrum of tests and simulations. The resulting findings are incorporated into the further development and optimisation of specific accumulators and their method of operation for various applications. In particular, these include the use of supporting grids and providing balancing energy as well as temporarily storing electricity from fluctuating generators, such as PV systems, in portable devices and electrified drive trains.

// Contact

Dr. Harry Döring
E-mail: harry.doering@zsw-bw.de
Phone: +49 (0)731 95 30-602

// Batteriesystemtechnik Battery system technology

// Thermische Untersuchungen von Speichersystemen

Batterien haben als elektrochemische Speicher die Eigenschaft, im Betrieb bei erhöhten Temperaturen Speicherkapazität und Leistungsfähigkeit zu verlieren. Diese temperaturinduzierte beschleunigte Alterung führt zu einer verkürzten Lebensdauer und zu erhöhten spezifischen Kosten der Batterie. Daher ist es für den Betrieb einer Batterie notwendig, deren thermische Eigenschaften zu untersuchen, zu verstehen und geeignete Kühlkonzepte zu entwickeln. Im Fachgebiet ECA wurden dazu Messplätze aufgebaut und entsprechende Verfahren zur thermischen Charakterisierung etabliert.

Mit Hilfe einer Wärmebildkamera ist es möglich, die Temperaturverteilung auf der Oberfläche einer Batterie abzubilden und abhängig von den Betriebsbedingungen heiße Stellen zu detektieren. Ein tieferer Einblick in die Zelle ist durch die Vermessung der Wärmeleitfähigkeit von Komponenten mit der sogenannten Plattenmethode möglich, bei der der Wärmedurchgang eines Versuchsobjekts bestimmt wird. Zusammen mit am ZSW entwickelten elektrochemischen Modellen ist es möglich, das thermische Verhalten einer Batterie dynamisch und orts aufgelöst zu simulieren und die Ergebnisse im Test zu validieren. Für die Entwicklung und Überprüfung von Kühlstrategien steht seit 2011 zudem eine Kühlanlage zur Verfügung, die mit unterschiedlichen Kühlmedien arbeitet.

// Thermal investigations of energy storage systems

As electrochemical storage systems, batteries have a tendency to lose their storage capacity and performance capability during operation with increased temperatures. This temperature-induced, accelerated ageing leads to a reduced service life and to increased specific battery costs. When operating batteries, it is therefore necessary to investigate and understand their thermal properties and to develop suitable cooling concepts. In the ECA research department, measuring stations have been constructed and corresponding processes for thermal characterisation established.

Using thermal imaging cameras, it is possible to depict the temperature distribution on the surface of batteries and to detect hot spots in accordance with the operating conditions. A greater insight into cells can be gained by measuring the thermal conductivity of components using the so-called plate method in which the heat transfer through a test object is determined. In combination with the developed electro-thermal models, it is now possible to simulate the thermal behaviour of batteries both dynamically and in spatially resolved terms and to validate the test results. In order to develop and verify cooling strategies, a cooling plant that works with different cooling media has also been made available since 2011.



// Abb. oben: Thermographieaufnahmen einer Flachzelle in unterschiedlichen Betriebszuständen.
// Fig. above: Thermographic images of a pouch cell under different operating conditions.



// Impedanzmessung an elektrochemischen Energiespeichern.
// Measuring the impedance of electrochemical energy storage systems.

// Batteriesicherheitstests

Battery safety testing

// Sicherheitsaspekte der Batterie-Energiespeicher für mobile Anwendungen

Die Realisierung einer effizienten Mobilität auf Basis von Elektro- und Hybridfahrzeugen erfordert eine stetige Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte der Batterien, wodurch sich die Entwicklung neuer Batterietechnologien mit neuen chemischen Prozessen und Materialien bedingt. Daraus können sich zusätzliche Probleme für die Betriebssicherheit der Batterie und die Gewährleistung der Sicherheit auch in abnormalen Betriebszuständen (z. B. Ausfall von Überwachungseinrichtungen) ergeben.

Für Batterien ist es aus diesem Grund unabdingbar, neben der Bestimmung der elektrischen Parameter auch ihr Verhalten in Extremsituationen (mechanisch, elektrisch, thermisch) zu verstehen, um ein mögliches Gefahrenpotenzial abzuschätzen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu realisieren. Demzufolge werden verschiedene Missbrauchsuntersuchungen durchgeführt, die eine Gefährdungsklassifizierung zulassen. Im Rahmen eines von der Bundesregierung geförderten Projektes wurden Ergebnisse von Untersuchungen nach den in Deutschland angewandten Normen und nach der entsprechenden in China Norm QC-T 743 miteinander verglichen und Vorschläge für die Harmonisierung der Testspezifikation unterbreitet. Sowohl am ZSW als auch am NOVERI (North China Vehicle Research Institute) wurden diese Untersuchungen z. T. im gegenseitigen Beisein an Zellen und Modulen eines 100-Ah-Li-FePO₄-Systems ausgeführt und bewertet.

// Safety aspects of the energy storage batteries in mobile application

The realisation of an efficient mobility based on electric and hybrid vehicles requires a continuous increase in power and energy density of batteries which, on the other hand, requires new battery technologies with new chemical processes and materials. As a consequence of this, additional problems might arise in terms of battery safety aspects. An acceptable remaining risk has to be ensured even under abuse conditions (for example, caused by the loss of functionality of control units).

Therefore, it is absolutely necessary to know the battery behaviour in extreme abuse situations (mechanical, electrical and thermal) in order to evaluate the risk and hazard potential and to initiate actions to minimise the remaining risk potential. Different abuse tests are carried out in order to make a hazard potential classification. It was the goal of a project subsidised by the Federal Government to compare the results of abuse tests carried out according to standards in Germany to those carried out according to the Chinese standard QC-T 743 and to make a proposal for harmonized test procedures if possible. Tests were carried out at ZSW as well as at the NOVERI (North China Vehicle Research Institute). Tests were carried out for a 100Ah Li-FePO₄ system under inspection of the opposite party and the results were analysed jointly.



// Rauchemission bei Nagel-Penetrationstest für ein Lithium-Zellen-Modul für die EV-Applikation.
// Smoke emission during nail penetration test for a Li-cell-module for EV application.

// Batterietests – von der Zelle bis zum Gesamtsystem

Battery tests – from the cell to the overall system

// Elektrische Untersuchung von Batterien und Batteriesystemtechnik

Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens von Batterien werden Zellen und Module sogenannten Performance- und Lebensdauertests unterzogen. Um eine möglichst realitätsnahe Charakterisierung von Batterien zu erreichen, werden die dazu verwendeten Prüfpläne, die den zeitlichen Verlauf der elektrischen Belastung beschreiben, auf die spezifische Anwendung zugeschnitten. Für die beschriebenen Tests steht eine Vielzahl an Testkanälen mit unterschiedlichen Leistungsklassen von Kleinzellen bis zu Hochvoltspeichern zur Verfügung. Zur Simulation der thermischen Umgebung sind am ZSW Klimakammern verschiedener Größen bis hin zur befahrbaren Kabine für Elektrofahrzeuge vorhanden. Ist ein tieferer Einblick in die Zelle und die darin stattfindenden elektrochemischen und physikalischen Vorgänge gewünscht, stehen Potentiostaten für die Impedanzspektroskopie sowie ein Spektrumanalysator bereit. Das test- und theoriebasierte Wissen über die Batterieeigenschaften wurde in ein dynamisches, parametrierbares Batteriemodell übersetzt, das mit realen Fahrzyklen von Elektrofahrzeugen und PV-Einspeiseprofilen von stationären Speichern validiert werden kann. Des Weiteren wurden Verfahren der Zustandsschätzung für den Lade- und den Alterungszustand von Batterien entwickelt und implementiert, die in einem Batteriemanagementsystem zum Einsatz kommen.

// Electrical investigation of batteries and battery system technologies

To characterise the electrical properties, performance capability and ageing behaviour of batteries, the cells and modules undergo performance and service life tests. In order to characterise batteries as realistically as possible, the respective testing plans deployed for this purpose, which are used to describe the chronological course of the electrical loading, are tailored to the specific application. A diverse range of test channels with different performance classes, ranging from small cells to high-voltage storage systems, are available for the aforementioned tests. To simulate the thermal environment, not only have climate chambers in various sizes been procured but also drive-in cabins for electric vehicles. If greater insights into the cell and the electrochemical and physical processes occurring inside are required, potentiostats for the impedance spectroscopy and a spectrum analyser are available. The knowledge on battery properties, which is based on tests and theory, has been translated into a dynamic, parameterisable battery model that can be validated with the actual driving cycles for electric vehicles and the PV feed-in profiles from stationary storage systems. In addition, processes for estimating the state of charge and state of health of batteries have been developed and implemented in battery management systems.



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

// 50 Testkanäle für Kleinzellen.
// 50 test channels for small cells.

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

// Unsere Kernkompetenzen

Technologien für neue Energiespeicherkonzepte

Die effiziente Speicherung von elektrischer Energie wird zur zentralen Herausforderung der sicheren Energieversorgung in den kommenden Jahren. Dabei rücken Verfahren wie die Redox-Flow-Zelle oder Metall-Luft-Zellen wieder in den Fokus der Forschung. Auch die Erzeugung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff über Elektrolyse gewinnt zunehmend an Bedeutung. Für all diese Themen spielen neue Aktivmaterialien und neue Zellkonzepte eine zentrale Rolle. So ist die Qualität von Wasserstoff von entscheidender Bedeutung für Lebensdauer und Betriebssicherheit von Brennstoffzellensystemen. Unser Team verfügt über langjährige Erfahrung auf diesen Gebieten und über die Infrastruktur und Möglichkeiten, neue technologische Ansätze im Labor schnell zu verifizieren und demonstrieren.

Komponenten und Materialien für die nächste Generation von Brennstoffzellen

Durch ein vertieftes Verständnis der elektrochemischen Prozesse der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC) können neue Ansätze zur Steigerung der Aktivität von Brennstoffzellen erforscht, bzw. Möglichkeiten zur Minimierung bzw. Vermeidung von Edelmetallkatalysatoren untersucht werden. Im Fokus der experimentellen Arbeiten stehen Untersuchungen an neuen Funktionsmaterialien wie Membranen, Elektrokatalysatoren etc. Des Weiteren die Entwicklung neuer Konzepte für Aktivkomponenten wie Elektroden, Membran-Elektroden-Anordnungen (MEAs) sowie die Bestimmung der Beständigkeit struktureller Komponenten für beispielsweise Dichtungen oder Bipolarplatten.

// Our main focus

Technologies for new energy storage concepts

The efficient storage of electrical energy will become a central challenge facing energy supplies in the next 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. In addition, hydrogen quality is of crucial importance with regard to the lifetime and reliability of fuel cell systems, 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.

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 as regards energy density. As a result of the complex electrochemical processes on the alcohol electrode, alcoholoperated cells have lower power densities than hydrogen-operated cells. An in-depth understanding of the electrochemical processes in PEMFC will make it possible to research new approaches for increasing the electrochemical oxidation activity of alcohols or investigate possibilities for minimising or avoiding noble metal catalysts. Our experimental work focuses on investigating new function materials, e.g. membranes, electrocatalysts, etc. Furthermore, we are working on new concepts for active components such as electrodes, membrane electrode assemblies, as well as determining the durability of structural components as for example sealing or bipolar plates.

// Contact

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

// Neue Materialien für Brennstoffzellen

New materials for fuel cells

// Membran-Elektroden-Anordnungen (MEAs) für Brennstoffzellen mit erhöhter Betriebstemperatur

Die Leistungsdichte von Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) steigt stark mit der Temperatur an. Aus diesem Grund ist es wünschenswert, das Betriebstemperaturfenster von DMFC auf 130–150 °C anheben zu können. Die heute üblicherweise eingesetzten perfluorierten Sulfonsäuremembranen sind unter den sich daraus ergebenden Betriebsbedingungen im Kontakt mit wässriger Methanollösung nicht mehr stabil. Ferner ergeben sich hohe Verluste durch Methanol-Crossover. Neue, von Projektpartnern entwickelte Polyarylpolymeren weisen ein erweitertes Stabilitätsfenster auf.

Allerdings ist die Anbringung der Katalysatorschicht in den Elektroden erschwert. Ferner sind die Polyarylpolymeren nur in entzündlichen oder organischen Lösungsmitteln löslich. In einem Forschungsvorhaben wurde deshalb eine neue, wasserbasierte Rezeptur zur Herstellung leistungsfähiger Elektroden auf Polyarylmembranen entwickelt. Unter Einsatz von Detergenzien wurde aus der Ionomerlösung in organischen Lösungsmitteln eine stabile wasserbasierte Dispersion hergestellt, mit Katalysatorpulver zu einer Tinte verarbeitet und mittels Sprühbeschichtung auf eine trockene Elektrolytmembran appliziert. Durch Optimierung der Tintenzusammensetzung und der Verarbeitungsparameter konnten Elektroden hergestellt werden, die ein gegenüber alternativen Anoden verbessertes Verhalten bei höheren Stromdichten zeigten.

// Vergleich der Strom-Potenzialkurven von DMFC-Anoden, die nach unterschiedlichen Rezepturen hergestellt wurden.
// Comparison of the current-potential curves of DMFC anodes that were produced using different compositions.

”

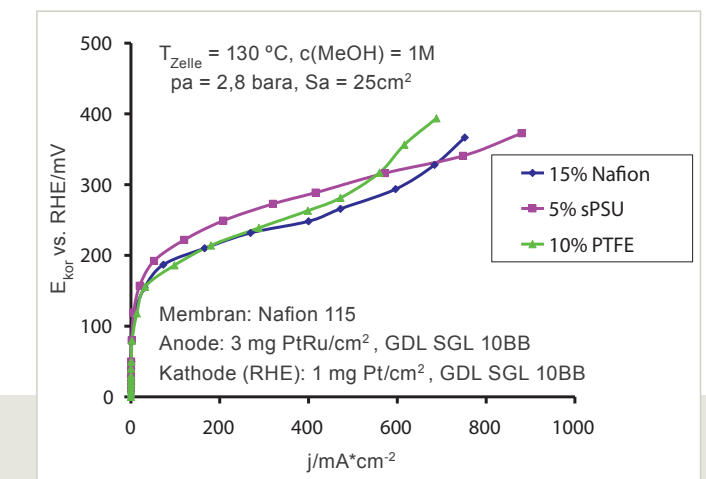
// Dr. Ludwig Jörissen

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

// Membrane electrode assemblies (MEAs) for fuel cells with increased operating temperatures

The power density of direct-methanol fuel cells (DMFC) increases considerably with temperature. For this reason, it is preferable to raise the operating temperature range for DMFCs to 130–150 °C. The perfluorinated sulphonic acid membranes typically used today are no longer stable in the resulting operating conditions when in contact with aqueous methanol solutions. There are also high losses as a result of the methanol crossover. New polyaryl polymers developed by the project partners have an extended stability window. However, this makes it more difficult to apply the catalyst layer in the electrodes.

Furthermore, polyaryl polymers are only soluble in flammable or toxic organic solvents. In the project, a new water-based composition was developed for manufacturing more powerful electrodes on polyaryl membranes. By using detergents, a stable, water-based dispersion was produced from the ionomer solution in organic solvents, which was then processed with a catalyst powder to form a dye and sprayed onto a dry electrolyte membrane. By optimising the dye composition and the processing parameters, it was possible to produce electrodes that displayed improved behaviour at high current densities relative to alternative anodes.



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 an der Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC)-Technologien. Unsere Kernkompetenzen umfassen die Konstruktion, Charakterisierung und Simulation, den 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 Herstellertechnik 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 und völlig neue Ansätze entwickelt und etabliert werden. Entscheidend dafür ist die Verifikation der Simulationsergebnisse mit Hardware und realitätsnahen Experimenten. Ein Beispiel ist das Kernthema Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen. Mittels einer am ZSW vorhandenen μ -CT-Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht und Modellrechnungen validiert werden. Ergänzend stehen gemeinsam mit einem Partner entwickelte Verfahren im Bereich der Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Visualisierung von Komponenten, Zellen und Stacks zur Verfügung. Diese Technologien ermöglichen zeitliche und räumliche Auflösungen, die zu den weltweit besten gehören.

// Our main focus

The research department is working on 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 comprises fuel cell stack power ranges from just a few watts to 100 kW. The main focus is on transferring 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 failure 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 allow the optimisation of the structures of components and operating conditions. In addition, modern simulation methods also allow the development and establishment of completely new innovative approaches. What is 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 allow simulation results to be verified under realistic operational conditions and impressively displayed. The technology jointly developed with a partner achieves temporal and spatial resolutions that are among the best worldwide.

// Brennstoffzellen – Technologien und Herstellverfahren

Fuel cells – technologies and manufacturing processes

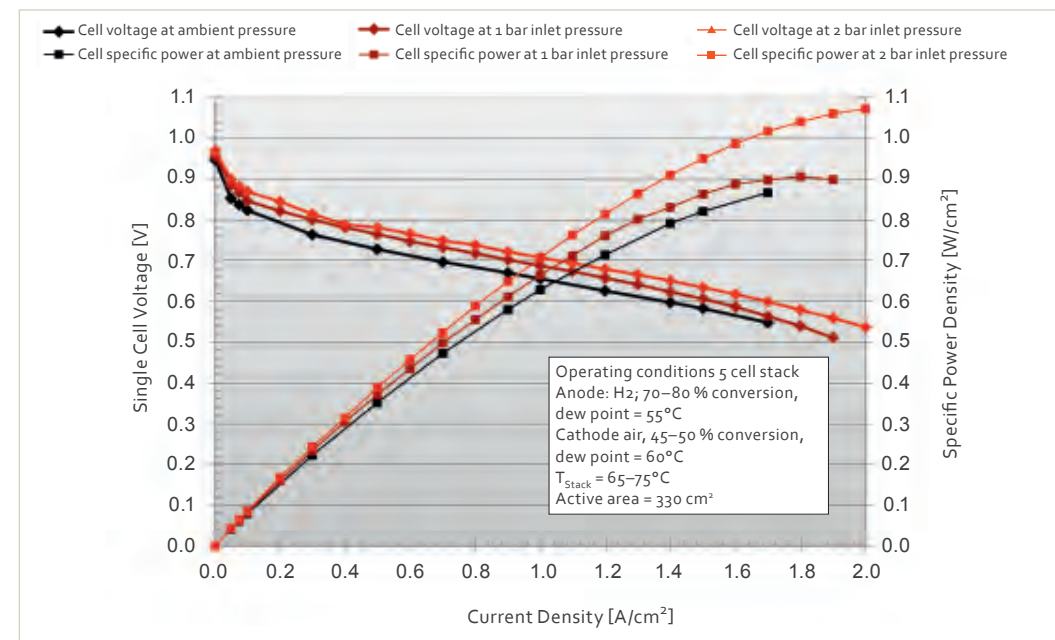
// Automobiltauglicher Brennstoffzellen-Stack

Basierend auf den Anforderungen der internationalen Automobilindustrie wurde ein neues automobiltaugliches Stackdesign entwickelt. Die Konstruktion wurde unter Zuhilfenahme sowohl von strömungs- als auch struktureller Modellierung erstellt und erfüllt hohe Anforderungen an gewichts- bzw. volumenspezifische Leistungsdaten. Unter automobilnahen Betriebsbedingungen wurden Stromdichten von bis zu 2 A/cm² und eine Leistung von mehr als 1 W/cm² erreicht. Diese Daten entsprechen bezogen auf den Aktivbereich einer volumenbezogenen Leistungsdichte von über 3,5 kW/l und einer gewichtsbezogenen Leistungsdichte von mehr als 1,7 kW/kg. Damit steht am ZSW eine Test- und Entwicklungsplattform auch für den Automobilbereich zur Verfügung. Unsere Erfahrung mit der Optimierung von Stackdesigns, kombiniert mit einer leistungsfähigen Brennstoffzellen-Testinfrastruktur, liefert so wertvolle Resultate zur Leistungsoptimierung von Brennstoffzellen.

// Automotive fuel cell stack

A new automotive stack design has been developed based on the requirements of the international automotive industry. It was designed using both flow and structural-mechanical modelling and meets the demanding requirements with respect to weight- and volume-specific performance data. Under automotive-based operating conditions, current densities of up to 2 A/cm² and power densities of more than 1 watt per square centimetre were achieved. In relation to the active area, this data corresponds to a volume-related power density of more than 3.5 kW per litre and a weight-related power density of more than 1.7 kW/kg. So a fuel cell test and development platform is now available for the automotive sector at ZSW. Our experience with optimising the stack design, combined with our powerful fuel cell testing infrastructure, therefore enables us to provide valuable results for optimising the output of fuel cells.

// Kennlinienfeld für einen automobiltauglichen Brennstoffzellen-Stack.
// Characteristic curve diagram for a fuel cell stack suitable for vehicles.



// Contact

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

”



// 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.

// Optimierung von Brennstoffzellen

Optimising fuel cells

// Entwicklung eines Brennstoffzellen-Stacks für flüssige Brennstoffe

Im Rahmen eines Projektes zur Entwicklung von Mitteltemperatur-Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (MT-DMFC) wurde neben dem Endplattendesign insbesondere das Anodenflowfield optimiert. Die Flowfieldauslegung erfolgte mit CFD. Als Basis wurde ein Mehrfach-Mäanderflowfield verwendet. Die Berechnungen zeigten, dass es insbesondere bei hohen Stromdichten von 600 mA/cm^2 zu unterversorgten Bereichen kommen konnte. Deshalb wurde eine Stegbreitenvariation durchgeführt und schließlich ein optimiertes Flowfield mit geringerer Parallelisierung entwickelt. Dieses Flowfield zeigte auch bei hohen Stromdichten von 600 mA/cm^2 eine homogene Methanolverteilung und -abreicherung über den aktiven Bereich. Außerdem wurden die Druckgradienten und Strömungsgeschwindigkeiten erhöht, sodass ein besserer Austrag von gasförmigem Kohlendioxid zu erwarten ist. Das Flowfield lässt deshalb aufgrund seiner deutlich besseren Reaktandenverteilung und -versorgung und seiner besseren CO_2 -Austragsfähigkeit eine signifikant bessere Leistung des MT-DMFC-Stacks erwarten.

// Development of a fuel cell stack for liquid fuels

As part of a project on innovative materials and processes for MT-PEM fuel cells, an MT-DMFC stack is currently being developed that optimises the end plate design and, in particular, the anode flow field. The flow field is being designed using computational fluid dynamics (CFD). A multiple meander flow field was used as the basis. The calculations showed that under-supplied areas occurred in particular when there were high current densities of 600 mA/cm^2 . For this reason, the gap width was varied and an optimised flow field with lower parallelisation was then developed. This flow field also displayed homogenous methanol distribution and depletion even with high current densities of 600 mA/cm^2 . In addition, the pressure gradients and flow speeds were increased so that an improved discharge of gaseous carbon dioxide can be expected. The flow field's considerably improved distribution and supply of reactants and its improved ability to discharge CO_2 should therefore lead to significantly improved outputs from the MT-DMFC stack.

// Methanol-Massenanteil in der GDL bei 600 mA/cm^2 . Zufluss rechts oben, Abfluss links unten. Basisflowfield (oben), optimiertes Flowfield (unten).
// Methanol mass fraction in the GDL at 600 mA/cm^2 . Inflow: upper right, outflow: lower left corner. Basis Flowfield (top), Optimized Flowfield (down).

// Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten

Characterisation of fuel cell components

// Qualitätskontrolle für Bipolarplatten und Gasdiffusionslagen (GDL) für Brennstoffzellen

Im Rahmen von Industrieprojekten wurden Untersuchungen zur Qualitätskontrolle von Bipolarplatten durchgeführt. Für die einwandfreie Funktion von Brennstoffzellenstacks werden an die verbauten Komponenten sehr hohe Maßhaltigkeitsanforderungen gestellt. Eine entscheidende Rolle für die Funktion spielt dabei auch die Bipolarplatte. Um die Funktionen (Medienversorgung, Medientrennung, Geometrie) der Bipolarplatte zu gewährleisten, müssen die messbaren Eigenschaften wie Kanaltiefe, Kanalform, Planparallelität und Außenkontur nach der Fertigung überprüft werden. Zur Qualitätskontrolle wurde ein hochauflösender optischer 3-D-Digitalisierer verwendet, der flächenhaft die Bauteilgeometrie der Bipolarplatte als Punktwolke darstellt. Damit ist es möglich, flächenhafte Abweichungen zum CAD-Modell darzustellen und Schnittanalysen durchzuführen, um somit Rückschlüsse auf die Fertigungsqualität zu erhalten.

Weitere zentrale Aspekte für die Funktion von Brennstoffzellen bestehen in der Morphologie und in den Oberflächeneigenschaften von GDLs. Diese können wir beispielsweise mittels μ -CT oder mit Wasserdampf analysieren.

// Quality controls for bipolar plates and gas diffusion layers (GDLs) for fuel cells

As part of an industrial project, an investigation was conducted to control the quality of bipolar plates. In order to ensure the smooth functioning of fuel cell stacks, extremely high demands are made regarding the precision of the installed components. The bipolar plates also play a decisive role in terms of correct functioning. In order to ensure the functions of the bipolar plates (media supply, media separation, geometry), measurable properties such as the channel depth, channel shape, plane parallelity and outer contour have to be checked after production. For quality control, a high-resolution optical 3D digitizer was used that extensively depicts the component geometry of the bipolar plates as a point cloud. This makes it possible to depict deviations from the CAD model across a wide area, conduct interface analyses and thus determine the production quality.

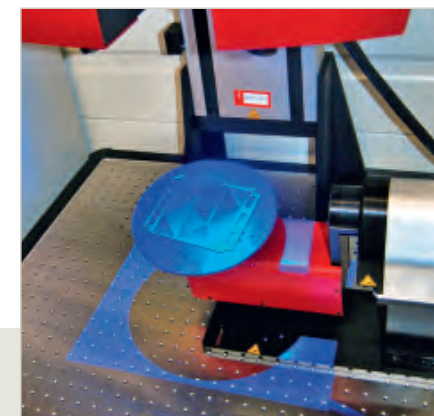
Further central aspects concerning the functioning of fuel cells include the morphology and the surface properties of GDLs. It is possible to depict these, for example, using μ -CT or water vapour sorption analysis.

// Contact

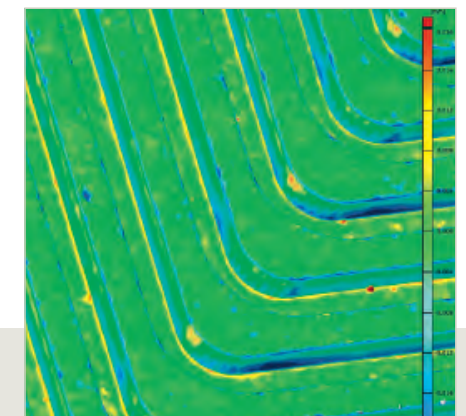
Dr. Joachim Scholta
E-mail: joachim.scholta@zsw-bw.de
Phone: +49(0)731 95 30-206



// Ermittlung von Morphologie und Oberflächeneigenschaften mittels μ -CT.
// Determination of the morphology and surface properties using μ -CT.



// 3-D-Vermessung von Brennstoffzellen-Komponenten mittels Streifenlichtprojektion.
// 3D measurement of the fuel cell components using strip light projection.



// 3-D-Bipolarplattenstruktur, Abweichung der Struktur im Vergleich mit CAD-Daten.
// 3D bipolar plate structure, deviation of the structure in comparison with CAD data.

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

// Unsere Kernkompetenzen

Brennstoffzellensysteme

Über 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 mit 20 voll-automatisierten 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 kosten-effizienten Rund-um-die-Uhr-Betrieb. Eine umfangreiche Analytik ermöglicht die detaillierte Bewertung von Alterungsvorgängen und ausführliche Fehleranalysen.

Mikroreformer für flüssige Brennstoffe

Flüssige Brennstoffe wie Methanol sind aufgrund ihres hohen Energieinhaltes und der einfachen Speicherung sehr wichtig. Wir entwickeln hochkompakte Komponenten für die Reformierung dieser Brennstoffe und die Aufbereitung der Edukte und bauen komplette Reformer Systeme.



// Contact

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

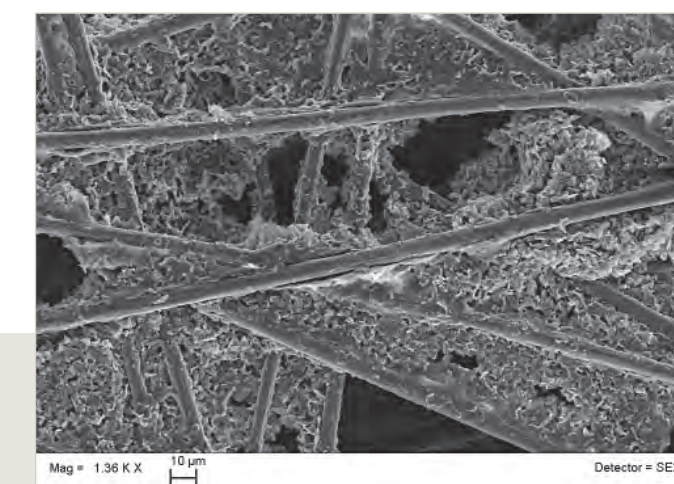
// Brennstoffzellen-Testzentrum Fuel cell test centre

// Modernisierung und Erweiterung des Brennstoffzellen-Testfeldes

Im August 2011 wurde ein über zwei Jahre durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördertes Projekt erfolgreich abgeschlossen. Projektziele waren die Modernisierung des Brennstoffzellen-Testfeldes, der Ausbau der Prüf- und Qualitätssicherungsmethoden und die Verbesserung des Rapid-Prototyping-Prozesses von Brennstoffzellen-Stacks. Im Brennstoffzellen-Testfeld stehen jetzt mehr als zwanzig Testplätze mit einem Leistungsbereich von 100 W_e bis 100 kW_e zur Verfügung. Damit können fast alle Brennstoffzellen-Anwendungen getestet werden, von portablen über stationäre bis zu automotiven Stacks und Systemen. Die gesamte Infrastruktur ist für kontinuierlichen Testbetrieb ausgelegt.

Mit dem Vorhaben wurde das Testfeld u. a. im Bereich 10 bis 30 kW deutlich erweitert. Die hohe Qualität der erfassten Messwerte wird durch hochwertige Kalibriergeräte gewährleistet. Die Qualitätssicherung von Stackkomponenten wurde z. B. bei der 3-D-Erfassung (siehe Abb. unten links) und bei der Oberflächenanalyse von porösen Strukturen entscheidend verbessert (siehe Abb. unten rechts).

Durch den Bau einer 100-kW-Automotive-Testplattform können relevante Betriebsparameter nicht nur am Brennstoffzellen-Stack, sondern auch an den im System flexibel eingebauten Komponenten unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden.



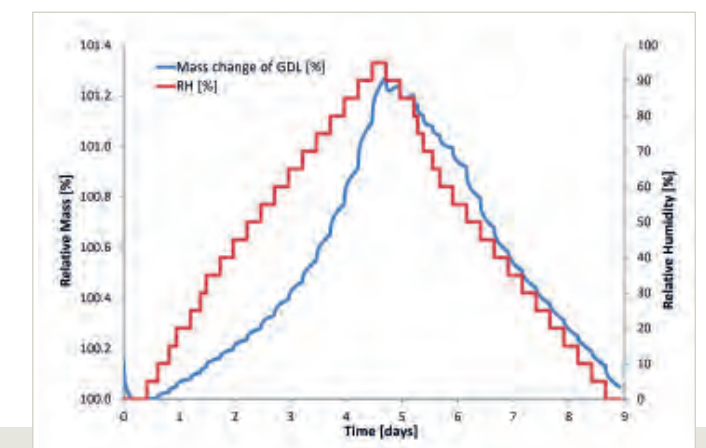
// Post-Mortem-Analyse: GDL-Material, aufgenommen mit dem modernisierten REM im Hochstrom-Mode.
// Post-mortem analysis: High-voltage mode picture of a GDL material made with the modernised SEM.

// Modernisation and expansion of the fuel cell testing facility

In August 2011, a project funded for two years by the German Ministry of Economics and Technology (BMWi) was successfully concluded. The project was aimed at modernising the fuel cell testing facility, developing testing and quality control methods and improving the rapid prototyping process for fuel cell stacks. The fuel cell testing facility now has more than twenty test stations available with output ranges between 100 W_e and 100 kW_e. This therefore enables almost all fuel cell applications to be tested, including portable, stationary and automotive stacks and systems. The entire infrastructure is designed for continuous test operation.

In the context of the project, the test facility was considerably extended, also in the 20-30 kW range. High-quality calibration devices ensure the recorded measurement values. The quality assurance of stack components was decisively improved, for example, in relation to 3D capturing (see Fig. below left) and the surface analysis of porous structures (see Fig. below right).

The installation of a 100-kW automotive test platform enables the operation and investigation of fuel cell stacks under realistic conditions in one system.



// Vergleich der Sorption und Desorption von Wasser für neues (A) und gealtertes (B) GDL-Material.

// Comparison of the sorption and desorption of water for new (A) and aged (B) GDL material.

// Contact

Günther Schlumberger
E-mail: guenther.schlumberger@zsw-bw.de
Phone: +49(0)731 95 30-834



// Organisation und Verwaltung Organisation and Administration

// Unsere Kernkompetenzen

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

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

// Our main focus

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

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

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



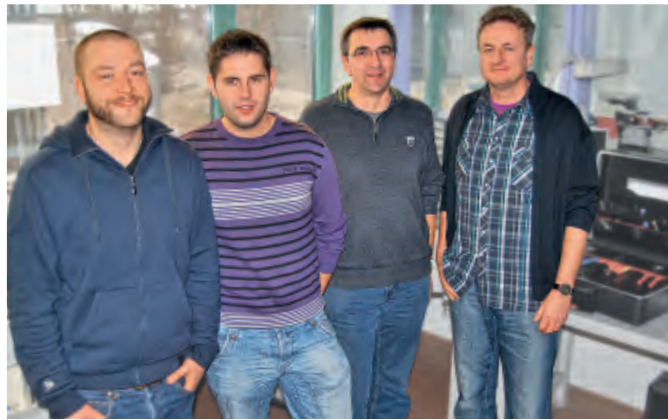
// Service-Team Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien
// Service team for the Electrochemical Energy Technologies Division



// Werkstatt Stuttgart
// Stuttgart workshop



// Zentrale Dienste
// Central Services



// Werkstatt elektronisch Ulm
// Electronics workshop, Ulm



// Werkstatt mechanisch Ulm
// Mechanics workshop, Ulm



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



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



// Bauleitung Ulm
// Construction Management, Ulm



// IT Stuttgart
// IT Stuttgart



// 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. Unser Rückblick auf das Jahr 2011 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. Our review of 2011 provides you with an insight into these activities.

// Staatspräsident Gül und Ministerpräsident Kretschmann besuchen das ZSW
Der türkische Staatspräsident Abdullah Gül besuchte am 21. September das ZSW in Stuttgart. Begleitet wurde er von Baden-Württembergs Ministerpräsident Winfried Kretschmann. Das Staatsoberhaupt und der Regierungschef informierten sich über den aktuellen Stand bei erneuerbaren Energien und über die Speicherung von Ökostrom in Methan – eine Technik, die am ZSW entwickelt wurde. Der Vortrag von Prof. Frithjof Staiß zur CIGS-Dünnschicht-PV, zu Preisentwicklungen und zu Anwendungspotenzialen der PV in Deutschland und in der Türkei sowie zur Power-to-Gas-Technologie stieß bei Staatspräsident Gül und seiner hochrangigen Delegation auf großes Interesse.

// President Gül and Minister President Kretschmann visit ZSW
On 21 September, the Turkish President, Abdullah Gül, visited ZSW in Stuttgart. He was accompanied by the Minister President of Baden-Württemberg, Winfried Kretschmann. The head of state and the government head learnt about the current state of renewable energies and the storage of green electricity in the form of methane – a technology that was developed at ZSW. The talk given by Prof. Frithjof Staiß on CIGS thin-film PV, price developments and the potential for PV applications in Germany and Turkey, as well as on Power-to-Gas technology, was met with considerable interest by President Gül and his high-ranking delegation.

// Spitzenplatz in der europäischen Batterieforschung: Einweihung des Labors für Batterietechnologie (eLaB) in Ulm
Mit der Errichtung des eLaB in Ulm entstand ein europaweit führendes Zentrum für die Batterieforschung. In nur zehn Monaten Bauzeit wurde das dreigeschossige Großlabor mit 6.600 m² Nutzfläche fertig gestellt. Es ist aufgeteilt in einen Kopfbau für die Büros und in drei Gebäudefinger für die Technik. Das eLaB bietet Raum für Fertigungstechnologien für Lithium-Ionen-Zellen und ein Sicherheits- und Testzentrum. Nach dem Einzug im Juni fand die offizielle Einweihungsfeier mit über 300 weiteren Gästen aus Politik, Forschung und Wirtschaft am 15. September statt.

// Leading position in European battery research: inauguration of the Battery Technology Laboratory (eLaB) in Ulm
The construction of the eLaB in Ulm has created one of Europe's leading centres for battery research. The three-storey, large-scale laboratory with 6,600 square metres of usable space was built in just ten months. It is divided into a front building for offices and three separate wings for technology. The eLaB houses production technology for lithium-ion cells along with a safety and test centre. After moving into the building in June, the official inauguration celebrations took place on 15 September, with more than 300 guests from politics, research and industry.

// Der türkische Staatspräsident Abdullah Gül und Ministerpräsident Winfried Kretschmann informieren sich am ZSW über erneuerbare Energien.
// The President of Turkey, Abdullah Gül and Minister President Winfried Kretschmann learn about renewable energy sources at ZSW.



// Dialog mit Experten und Fraktionen beim Parlamentarischen Abend am 30. Juni in Stuttgart
Im Mai 2011 nahm die neue grün-rote Landesregierung in Stuttgart ihre Tätigkeit auf. Im Rahmen eines Parlamentarischen Abends, zu dem die KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg und das ZSW gemeinsam einluden, wurde mit Vertretern aller Fraktionen unter dem Motto „Energiepolitik in Baden-Württemberg – was ist jetzt zu tun?“ diskutiert. Dr. Volker Kienzlen (KEA) gab einen Überblick, wie wichtig Energieeffizienz für eine klimaschonende Energieversorgung ist. Prof. Frithjof Staiß (ZSW) verdeutlichte die zentrale Bedeutung erneuerbarer Energien im Energiemix der Zukunft. Beide betonten, erneuerbare Energien müssten zusammen mit Energieeffizienz und Energieeinsparung gedacht werden. Wie die Kommunen den Energiewandel umsetzen können, erläuterte der Ludwigsburger Oberbürgermeister Werner Spec am Beispiel seiner Stadt.

// Dialogue with experts and parliamentary groups during Parliamentary Evening held on 30 June in Stuttgart
In May 2011, the new green-red (the Green Party and the SPD) regional coalition regional government came into power in Stuttgart. As part of a Parliamentary Evening jointly hosted by KEA, Climate Protection and Energy Agency of the State of Baden-Württemberg GmbH, and ZSW, representatives from all parliamentary groups were invited to discuss the topic "Energy policies in Baden-Württemberg – what needs to be done now?". Dr. Volker Kienzlen (KEA) explained the importance of energy efficiency for ensuring climate-protecting energy supplies, while Professor Frithjof Staiß (ZSW) underlined the central importance of renewable energies in the future energy mix. Both emphasised that renewable energy must be considered hand in hand with energy efficiency and energy savings. Ludwigsburg's Mayor, Werner Spec, explained how local communities can implement the energy turn-around using his own town as an example.

// 125 Jahre Automobil: 8. VDA-Gipfeltreffen am 22. November in Berlin
125 Jahre nach der Erfindung des Automobils steht die Industrie vor der größten Umwälzung ihrer Geschichte. Wie begegnen die Qualitätsmanager der Automobilindustrie diesen Herausforderungen? Zum Thema Batterien im Fahrzeug referierte ZSW-Vorstand Prof. Werner Tillmetz über die Forschungsaspekte zur Qualitätssicherung, zusammen mit Dr. Christian Mohrdieck (Daimler AG), der die Erfahrungen aus der Praxis darstellte.

// 125 years of the car: 8th VDA Summit on 22 November in Berlin
125 years after the invention of the car, the automotive industry is faced with the greatest transformation in its history. How do quality managers from the automotive industry deal with these challenges? With regard to batteries in vehicles, ZSW director Prof. Werner Tillmetz lectured on research aspects relating to quality assurance together with Dr. Christian Mohrdieck (Daimler AG), who talked about Daimler's experiences in practice.



// Bundesforschungsministerin Schavan, Landesfinanz- und -wirtschaftsminister Schmid und der ZSW-Vorstand bei der Einweihung des eLaB in Ulm.
// Federal Research Minister Schavan, State Minister of Finance and Economics Schmid and the ZSW Board at the inauguration of the eLaB in Ulm.



// Parlamentarischer Abend von KEA und ZSW zur Energiepolitik.
// Parliamentary Evening focussing on energy policies, hosted by KEA and ZSW in Stuttgart.



// Leistungsschau der Forschungsinstitute beim Tag der innBW.
// The research institutes' exhibition on the Innovation Alliance Day (innBW).

// ZSW beim Tag der Innovationsallianz Baden-Württemberg (innBW) in Stuttgart

Die zwölf Forschungsinstitute der Innovationsallianz Baden-Württemberg präsentierten am 14. Juli ihr konzentriertes Know-how beim Tag der Innovationsallianz im Haus der Wirtschaft in Stuttgart. Finanz- und Wirtschaftsminister Dr. Nils Schmid eröffnete die Veranstaltung mit dem Motto „Leidenschaftlich forschen. Verbindend denken. Zuverlässig handeln“. Das ZSW war mit Exponaten zu den Themen PV, Power-to-Gas und Brennstoffzellen präsent, Prof. Frithjof Staiß referierte zum Thema „Nachhaltige Mobilität“.

// „Nationale Bildungskonferenz Elektromobilität“ in Ulm

Das ZSW hat zusammen mit dem Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e. V. (WBZU) und der Universität Ulm die Organisation der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung initiierten ersten „Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität“ in Ulm übernommen. Es wurden Maßnahmen für eine Kompetenzroadmap entwickelt, die Orientierung für alle betroffenen Berufsgruppen – von Handwerk bis Akademie – im Umfeld der Elektromobilität geben soll. Prof. Werner Tillmetz leitete den Themenpart „Ausbildung von Akademikern“. Ein erfolgreiches Beispiel ist der Masterstudiengang „Energy Science Technology“ an der Universität Ulm, zu dessen Initiatoren und Dozenten Prof. Werner Tillmetz gehört.



// Ministerialdirektor Daniel Rousta übergibt Prof. Powalla am Tag der innBW den Förderbescheid für ein Landesprojekt zu CIGS-Dünnschichtsolarzellen.
// On the innBW Day, ministry department head Daniel Rousta gives Professor Powalla the grant notification for a regional state project on CIGS solar cells.

// ZSW on the Baden-Württemberg Innovation Alliance Day (innBW) in Stuttgart

On 14 July, the twelve research institutes in the Baden-Württemberg Innovation Alliance presented their concentrated know-how at the Innovation Alliance Day held in the Haus der Wirtschaft in Stuttgart. The Minister of Finance and Economics, Dr. Nils Schmid, opened the event, which was held under the motto “Research passionately. Think cohesively. Act reliably”. ZSW presented exhibits relating to Power-to-Gas systems and fuel cells, while Prof. Frithjof Staiß lectured on sustainable mobility.

// National Conference on “Education for Electromobility” in Ulm

Together with the Fuel Cell Education and Training Centre Ulm (WBZU) and Ulm University, ZSW organised the first National Training Conference on Electromobility. The conference, which was instigated by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), was held in Ulm. Measures were developed for a skills roadmap that is intended to provide orientation for all occupational groups concerned with e-mobility, ranging from specialist trades to academic disciplines. Prof. Werner Tillmetz headed the focus area “training academics”. A successful example is provided by the “Energy Science Technology” masters degree course at Ulm University. Prof. Werner Tillmetz promoted to initiate this degree programme and is now one of its lecturers.



// Prof. Tillmetz bei der 1. Nationalen Bildungskonferenz Elektromobilität in Ulm.
// Prof. Tillmetz at the 1st National Education Conference on e-mobility in Ulm.

// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations



// Das ZSW auf der Hannover Messe 2011.
// ZSW at the 2011 Hanover Industry Trade Fair.

// Das ZSW war 2011 auf folgenden Messen vertreten:

Design & Elektronik, München	16.2.2011
26. Symposium für photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	2.–4.3.2011
Hannover Messe Industrie	4.–8.4.2011
Intersolar Europe, München	8.–10.6.2011
26. EU-PVSEC, Hamburg	5.–8.9.2011
64. IAA, Frankfurt	15.–25.9.2011

// ZSW zum 11. Mal auf der Hannover Messe 2011

Das ZSW präsentierte „Brennstoffzellen, Batterien und Technologien zur Speicherung erneuerbarer Energien“ auf der weltweit größten Industriemesse. Am Messestand sorgte ein Modell im Maßstab 1:50 einer Anlage zur Umwandlung von Ökostrom in regeneratives Methan für besonderes Aufsehen beim Publikum und der Presse.

// ZSW auf der Intersolar Europe in München

Zum zweiten Mal präsentierte das ZSW auf der Intersolar Europe seine F&E-Dienstleistungen im Bereich PV. Ein Besuch des baden-württembergischen Ministers für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Franz Untersteller am ZSW-Stand bot die Gelegenheit zu einem Gespräch über die Entwicklung der vom ZSW entwickelten CIGS-Dünnschicht-Technologie und der PV-Industrie insgesamt.



// Das ZSW auf der Intersolar Europe in München.
// ZSW at Intersolar Europe in Munich.

// In 2011, ZSW was represented at the following trade fairs:

Design & Elektronik, Munich	16/02/2011
26 th Symposium for Photovoltaic Solar Energy, Bad Staffelstein	02–04/03/2011
Hannover Industrial Trade Fair	04–08/04/2011
Intersolar Europe, Munich	8–10/06/2011
26 th EU-PVSEC, Hamburg	05–08/09/2011
64 th IAA, Frankfurt	15–25/09/2011

// ZSW at the 2011 Hanover Industrial Trade Fair for the eleventh time

ZSW presented fuel cells, batteries and technologies for renewable energy storage at the world's largest industrial trade fair. At its trade fair booth, a 1:50 scale model of a plant for transforming green electricity into renewable methane attracted particular attention among the public and press.

// ZSW at Intersolar Europe in Munich

ZSW showcased its R&D services in the photovoltaic sector for the second time at Intersolar Europe. A visit to the ZSW booth by Baden-Württemberg's Minister of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector, Franz Untersteller, provided an opportunity to discuss the progress of the CIGS thin-film technology developed by ZSW and the PV industry as a whole.



// Umweltminister Untersteller besucht den ZSW-Stand auf der Intersolar.
// Environment Minister Untersteller visits the ZSW stand at Intersolar.



// Messestand des ZSW auf der 26. EU-PVSEC in Hamburg.
// ZSW stand at the 26th EU-PVSEC in Hamburg.

// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations



// Neue Broschüren zu den elektrochemischen Energietechnologien und zu Power-to-Gas.
// New brochures on electrochemical energy technologies and Power-to-Gas.

// ZSW auf der 26. EU-PVSEC in Hamburg

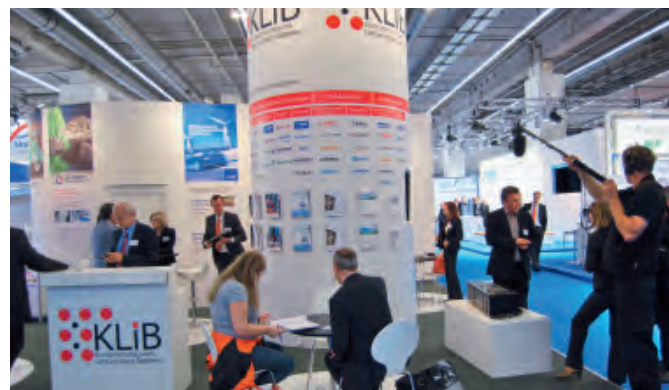
An der bedeutendsten europäischen PV-Tagung mit angeschlossener Messe, die im September 2011 in Hamburg stattfand, beteiligte sich das ZSW erneut mit zahlreichen Vorträgen und Publikationsbeiträgen sowie mit einem Messestand, der schwerpunktmäßig die Prüf- und Beratungsdienstleistungen des PV-Testlabors Solab präsentierte.

// Zellfertigung und Batteriesicherheit auf der 64. IAA in Frankfurt

Zum ersten Mal präsentierte sich das ZSW auf der 64. Internationalen Automobil-Ausstellung (IAA) in Frankfurt zusammen mit sieben weiteren Akteuren der Batteriebranche auf dem Gemeinschaftsstand des Kompetenznetzwerks Lithium-Ionen-Batterien (KLiB) in der Themenhalle Elektromobilität. Im Mittelpunkt des ZSW-Auftritts standen die Themen Zellfertigung und Sicherheit der mobilen Energiespeicher.

// Erster Messe- und Fachfilm online

„Batterien, Superkondensatoren und Brennstoffzellen – vom Material bis zur Systemintegration“ – der Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien in Ulm stellt sich vor. Der Film steht unverändert für Messen oder vertont auf Englisch und Deutsch mit einer Gesamtlänge von 6 Minuten zur Verfügung, siehe www.zsw-bw.de/infportal.



// Das ZSW ist Mitaussteller beim KLiB-Stand auf der IAA in Frankfurt.
// ZSW was a co-exhibitor at the KLiB stand at the Frankfurt Motor Show.

// ZSW at the 26th EU-PVSEC in Hamburg

At Europe's most important photovoltaic conference with associated trade fair, which took place in September 2011 in Hamburg, ZSW presented numerous lectures, publications and its own trade fair stand, which in particular showcased the testing and consultancy services provided by the Solab photovoltaic testing laboratory.

// Cell production and battery safety at the 64th IAA in Frankfurt

ZSW was also at the 64th Frankfurt Motor Show (IAA). Together with seven other players from the battery industry, it was represented at the joint stand of the Competence Lithium-Ion Batteries Network (KLiB) in the Electromobility Hall. The ZSW presentation focussed on cell production and the safety of mobile energy storage systems.

// ZSW's first trade fair and technical video available online

"Batteries, supercapacitors and fuel cells – from the material to the system integration" – the Electrochemical Energy Technologies Division in Ulm introduces itself. The video, which is available without sound for trade fairs or with an English or German commentary, has a total length of 6 minutes (see www.zsw-bw.de/infportal).



// Standbild aus dem ZSW Messe- und Fachfilm.
// Screenshot from the ZSW trade fair and technical video.

// Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW konnte in Zusammenarbeit mit externen Partnern sehr erfolgreich weiterentwickelt werden. Insgesamt wurden rund 1.346 (Vorjahr: 476) Presseergebnisse erzielt – der Rekord in der ZSW-Geschichte. Überdies stieg die Nachfrage nach Interviews mit ZSW-Experten erheblich an.

Das ZSW konnte sich 2011 überregional u. a. wie folgt platzieren:

- > Berliner Zeitung (Februar, Thema Batterien, Interview Prof. Tillmetz)
- > Die Welt (April, Power-to-Gas, Namensartikel Dr. Specht)
- > Die Zeit (September, Power-to-Gas, Artikel zur Technik)
- > dpa (September, eLaB, Meldung zur Eröffnung)

Die beste Resonanz erzielten folgende Forschungsthemen:

- > ZSW zeigt auf der Hannover Messe neue Stromspeichertechniken
- > Ökostrom kann Kernkraft in neun Jahren ersetzen
- > In einem Rutsch beschichten – Fortschritt bei der Entwicklung von flexiblen Dünnschichtsolarzellen
- > SolarFuel baut für Audi Pilotanlage (Partner-Presseinformation)
- > Millionen vom Land für Forschungsprojekt – ZSW baut in Ulm Produktionstechnologien für Lithium-Akkus auf

// Neuauflage der GBEC-Fachbroschüre

Die Fachbroschüre „Brennstoffzellen, Batterien und Superkondensatoren“ des Geschäftsbereichs Elektrochemische Energietechnologien (GBEC) gibt es seit September 2011 auf Deutsch und Englisch, ergänzt um die Informationen zum ZSW Labor für Batterietechnologie (eLaB).

// Power-to-Gas-Broschüre 2011

Die Broschüre entstand in Zusammenarbeit von ZSW, SolarFuel und Fraunhofer IWES und trägt den Titel „Power-to-Gas-Technologie. Erneuerbares Methan aus Ökostrom. Der Langzeitspeicher zum Ausgleich der Schwankungen von Wind- und Solarstrom“.

// Media relations

ZSW was able to successfully develop its public relations work in cooperation with external partners. Last year there were around 1,346 mentions in the press (476 in the previous year) – making this a new ZSW record. Furthermore, there was a considerable increase in requests for interviews with ZSW experts.

In 2011, articles relating to ZSW appeared in the following national newspapers:

- > Berliner Zeitung (February, interview about batteries with Professor Tillmetz)
- > Die Welt (April, Power-to-Gas, article written by Dr. Specht)
- > Die Zeit (September, Power-to-Gas, article on the technology)
- > dpa (September, eLaB, report on the opening)

The best response was generated by the following research topics:

- > ZSW showcases new electricity storage technologies at the Hanover Industrial Fair
- > Green electricity can replace nuclear energy in nine years
- > Coated in one go – progress in the development of flexible thin-film solar cells
- > SolarFuel constructs pilot plant for Audi (partner press release)
- > Millions from federal state for research project – ZSW develops production technologies in Ulm for lithium batteries

// New version of the GBEC technical brochure

The latest version of the Electrochemical Energy Technologies Division (GBEC) technical brochure on "fuel cells, batteries and supercapacitors", which has been available since September 2011 in German and English, has additional information on the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB).

// Power-to-Gas brochure 2011

The brochure was produced in cooperation with ZSW, SolarFuel and Fraunhofer IWES and is entitled "Power-to-Gas technology. Renewable methane from green electricity. The long-term storage system for balancing out fluctuations in wind and solar energy."



// Dokumentation
Documentation

// Haushalt Budget Development



// Haushalt

Das Einnahmenvolumen betrug im abgelaufenen Jahr 39,6 Mio. € und lag damit um mehr als 20 % über dem Wert des Vorjahres. Sowohl die Erträge aus Auftragsforschung als auch der Anteil der öffentlichen Zuwendungen – vor allem durch Investitionsprojekte aus dem Konjunkturpaket der Bundesregierung, aus Sondermitteln der EU und des Landes Baden-Württemberg – haben den Planansatz und den Vorjahreswert wieder deutlich überschritten. Die Investitionsmittel wurden vorrangig für den Neubau des ZSW-Labors für Batterietechnologie eLaB in Ulm eingesetzt, das im Jahr 2011 termingerecht fertiggestellt wurde. In Stuttgart profitierten die Infrastruktur für das Modultestlabor Solab sowie das Labor für neue Materialien in der Dünnschicht-PV.

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

// Budget

In the past year, the income volume amounted to €39.6 million, which was therefore around 20% higher than in the previous year. Both the revenues from contract research as well as the proportion of public subsidies – particularly for investment projects funded as part of the German government’s economic stimulus package or from special grants from the EU and the Federal State of Baden-Württemberg – again considerably exceeded the planned level and the previous year’s figure. The investment capital was primarily used for constructing ZSW’s new eLaB laboratory for battery technology in Ulm, which was completed in 2011. In Stuttgart, the infrastructure for the Solab module test laboratory also benefited as did the laboratory for new materials in thin-film PV.

The successful acquisition in the past year ensured an overall good utilisation of the research capacity in all departments and, owing to the more rational management that took place at the same time, led to improved cost coverage. The proportion of ins-

Der Anteil der institutionellen Förderung des Landes Baden-Württemberg (3,7 Mio. € im Jahr 2011) blieb nahezu unverändert.

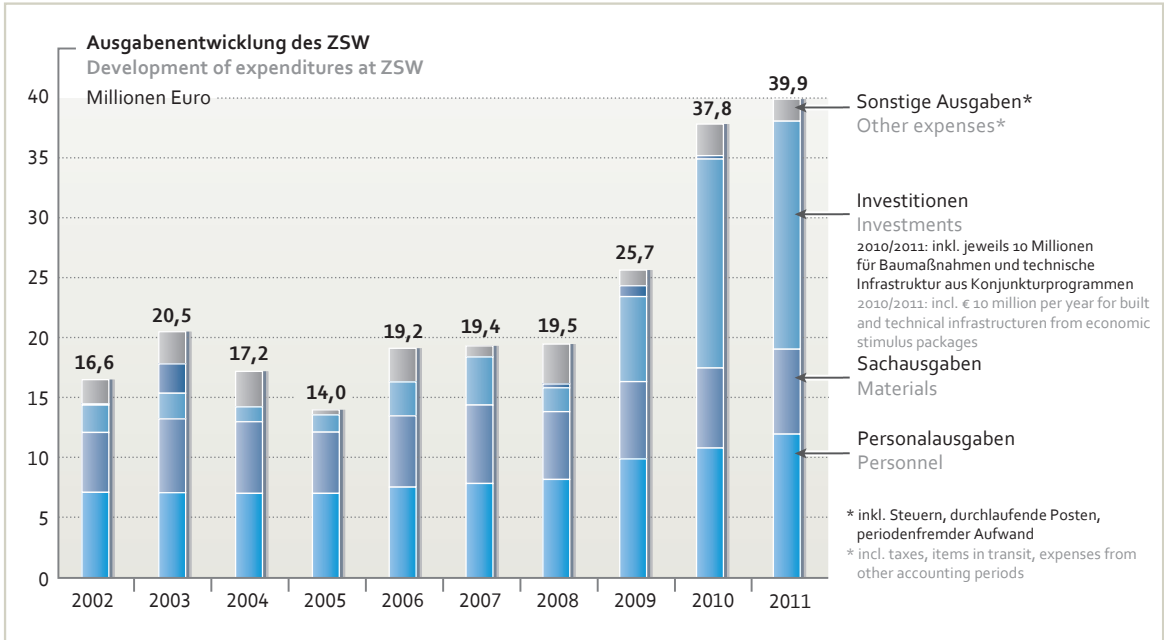
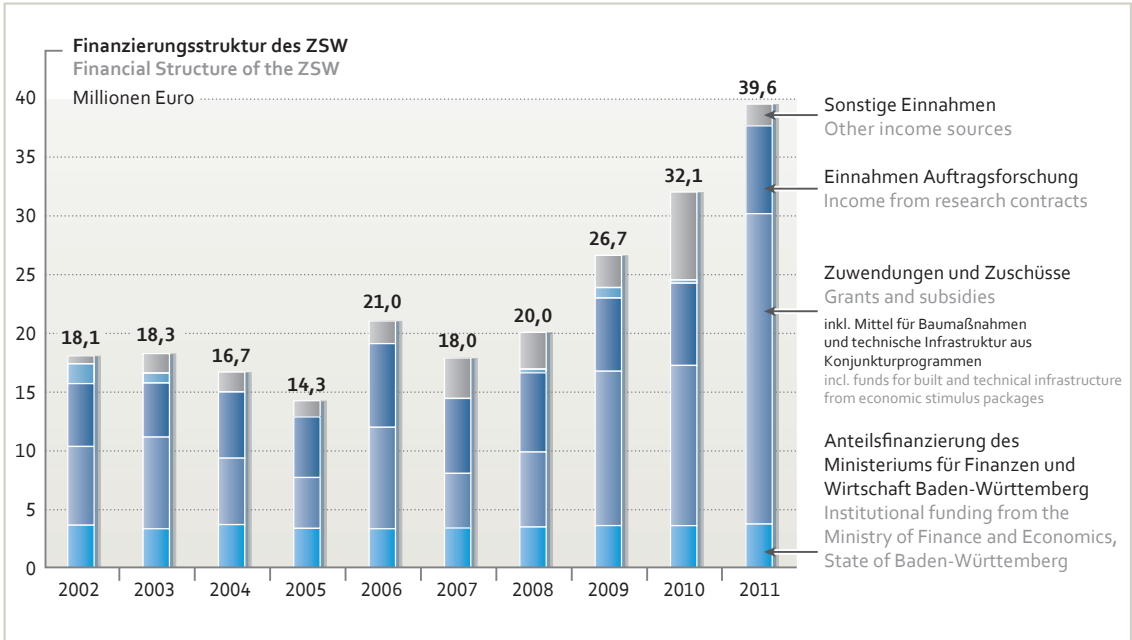
Die Gesamtausgaben lagen mit 39,9 Mio. € korrespondierend zur erfolgreichen Einwerbung von Investitionsprojekten deutlich über dem Vorjahr. Die Personalausgaben stiegen aufgrund der projektbedingten Ausweitung der Kapazität an.

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.

titutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg (€3.7 million in 2011) remained almost the same.

Total expenditure amounted to €39.9 million which, in accordance with the successful acquisition of investment projects, is considerably higher than in the previous year. Personnel expenditure rose as a result of the project-based increase in capacities.

In terms of the overall co-funding requirements as regards public subsidies, it is still the case that the successful acquisition of third-party funds, combined with a growing proximity to industry, is a decisive prerequisite for ZSW’s success.



// Personalentwicklung Staff Development



// Personalentwicklung

Wie in der mittelfristigen Finanzplanung und dem Wirtschaftsplan beabsichtigt, hat sich der Wachstumstrend beim Personal 2011 weiter fortgesetzt. Die Mitarbeiterkapazität erreichte zum 31. Dezember 190 Vollzeitstellen. Dies entspricht 207 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Mit einem Anteil von 83 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität unverändert hoch.

Die Quote der unbefristeten Arbeitsverträge ist 2011 gegenüber dem Vorjahr aufgrund von Neueinstellungen deutlich gesunken und liegt jetzt bei 56 % aller Beschäftigten. Im wissenschaftlich-technischen Bereich liegt der Anteil der unbefristeten Arbeitsverträge bei 52 %.

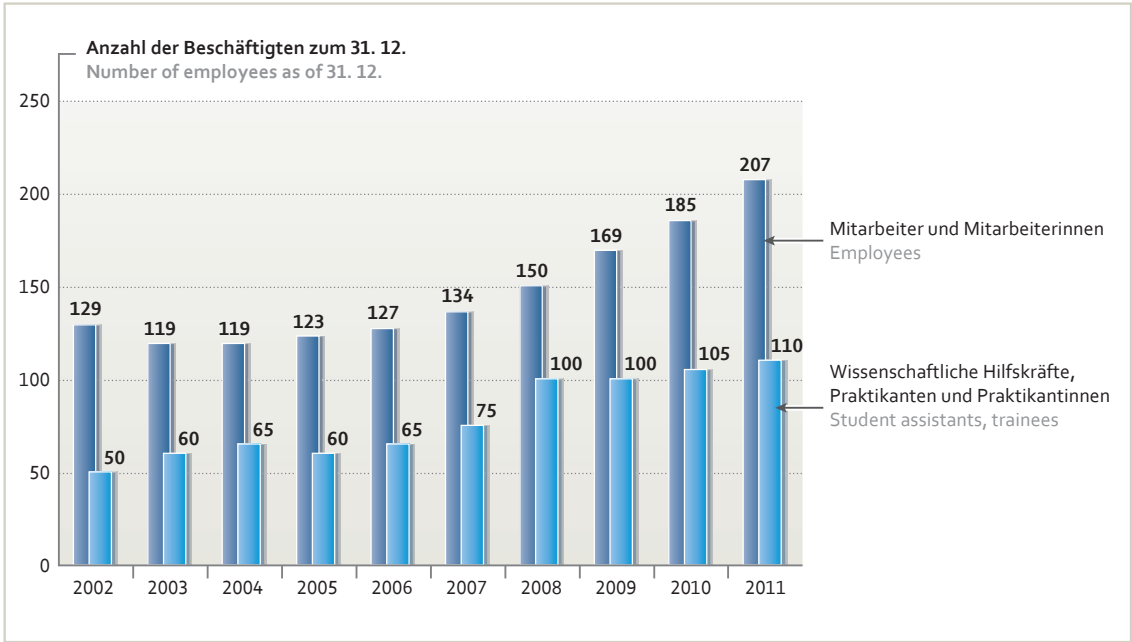
Das ZSW beschäftigt derzeit sieben Auszubildende. In der mechanischen Werkstatt Stuttgart werden vier Auszubildende zum Industriemechaniker ausgebildet.

// Staff development

In accordance with our medium-term financial and economic plan, staff numbers continued to increase in 2011. By 31 December, the staff capacity reached 190 full-time equivalent positions. This corresponds to 207 employees. With 83% of all staff active in the scientific and technical area, the level of productivity remains very high.

In 2011, as a result of new recruits, the share of permanent employment contracts decreased considerably compared with the previous year and now amounts to 56% of all employees. In the scientific and technical areas, 52% of those employed have permanent employment contracts.

ZSW currently employs seven trainees. Four apprentices are training to become industrial mechanics at the mechanical workshop in Stuttgart.



Darüber hinaus befinden sich jeweils eine Auszubildende als Kauffrau für Bürokommunikation in Stuttgart und Ulm und eine Chemielaborantin in Ulm in der Ausbildung.

Seit 31. Oktober 2011 ist das ZSW ein von der IHK geprüfter und nach dem Berufsbildungsgesetz anerkannter Ausbildungsbetrieb. Für die Übernahme der Ausbildungsverantwortung spricht die IHK dem ZSW mit einer Urkunde Dank und Anerkennung aus.

Im Berichtsjahr fertigen am Institut 25 Doktoranden ihre Dissertationen an.

Neben den nach dem Tarifvertrag der Länder beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sind am ZSW über 110 Studenten und Praktikanten tätig. Von besonderer Bedeutung sind die Vernetzung mit Hochschuleinrichtungen und die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten.

Das Fort- und Weiterbildungsangebot des ZSW mit sowohl fachspezifischen als auch fachübergreifenden Inhalten wurde mit sehr großem Erfolg in Anspruch genommen. Insgesamt fanden über 20 Fortbildungsveranstaltungen statt, an denen nahezu 100 Beschäftigte teilnahmen.

In addition there is a trainee office communications clerk in Stuttgart and a trainee chemical laboratory assistant in Ulm.

Since 31 October 2011, ZSW has become an approved Chamber of Industry and Commerce vocational training establishment recognised under the Vocational Training Act. The Chamber of Industry and Commerce (IHK) has awarded ZSW with a certificate in gratitude for and recognition of ZSW's services in assuming this training responsibility.

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

About 110 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.

Further and advanced training, with both specialist and interdisciplinary content, enjoyed considerable success. More than 20 further training events were held, in which almost 100 employees took part.

// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

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

/ Abou-Ras D. (HZB), Caballero R. (HZB), Fischer C.-H. (HZB), Kaufmann C. (HZB), Lauer mann I. (HZB), Mainz R. (HZB), Mönig H. (HZB), Schöpke A. (HZB), Stephan C. (HZB), Streeck C. (HZB), Schorr S. (FU Berlin), Eicke A., Döbeli M. (ETH Zürich), Gade B. (TFS), Hinrichs J. (TFS), Nunney T. (TFS), Dijkstra H. (TFS), Hoffmann V. (IFW), Klemm D. (IFW), Efimova V. (IFW), Bergmaier A. (UBW), Dollinger G. (UBW), Wirth T. (BAM), Unger W. (BAM), Rocket A. A. (Univ. Illinois), Perez-Rodriguez (IREC), Alvarez-Garcia J. (CRIC), Izquierdo-Roca V. (IN-UB), Schmid T. (ETH), Choi P.-P. (MPI), Müller M. (Univ. Magdeburg), Betram F. (Univ. Magdeburg), Christen J. (Univ. Magedeburg), Khatri H. (PVIC), Collins R.W. (PVIC), Marsillac S. (PVIC), Kötschau I. (centrotherm); **Comprehensive comparison of various techniques for the analysis of elemental distributions in thin films**; Microscopy and Microanalysis 17 (2011) 728–751

/ Bouttemy M. (ILV), Tran-Van P. (ILV), Gerard I. (ILV), Hildebrandt T. (ILV), Causier A. (ILV), Pelouard J.L. (LPN), Dagher G. (LPN), Jehl Z. (IRDEP), Naghavi N. (IRDEP), Voorwinden G. (WERes), Dimmler B. (WERes), Powalla M., Guillemoles J.F. (IRDEP), Lincot D. (LPN), Etcheberry A. (ILV); **Thinning of CIGS solar cells: Part I: Chemical processing in acidic bromine solutions**; Thin Solid Films 519 (2011) 7207–7211

/ Choi P.-P. (MPI-E), Cojocar-Mirédin O. (MPI-E), Würz R., Raabe D. (MPI-E); **Comparative atom probe study of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells deposited on soda-lime glass and mild steel substrates**; Journal of Applied Physics 110 (2011), 124513

/ Cojocar-Mirédin O. (MPI-E), Choi P. (MPI-E), Würz R., Raabe D. (MPI); **Atomic-scale characterization of the CdS/CuInSe₂ interface in thin-film solar cells**; Applied Physics Letters 98 (2011) 103504

/ Col sman A. (KIT), Pütz A. (KIT), Lemmer U. (KIT), Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E.; **Efficient semi-transparent organic solar cells with good transparency color perception and rendering properties**; Advanced Energy Materials 1 (2011) 599–603

/ Friedlmeier T., Powalla M.; **Energie aus dünnen Schichten – Analytik in der Produktion und Charakterisierung von CIGS-Modulen**; Laborpraxis, Februar 2011

/ Hassoun J. (Univ. of Rome), Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Scrosati B. (Univ. of Rome); **Electrochemical behavior of Sn und Sn-C composite electrodes in LiBOB containing electrolytes**; Journal of Power Sources 198 (2011), p.349

/ Haug V., Klugius I., Friedlmeier T., Quintilla A., Ahlswede E.; **Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells based on a simple sputtered alloy precursor and a low-cost selenization step**; Journal of Photonics for Energy 1 (2011) 01800

/ 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**; Thin Solid Films 519 (2011) 7464–7467

/ Heinrich M.P. (KIT), Zhang Z.-H. (KIT), Zhang Y. (KIT), Kiowski O., Powalla M., Lemmer U. (KIT), Slobodskyy A. (KIT); **Direct measurements of band gap grading in polycrystalline CIGS solar cells**; arXiv: 1009.3836v1 [physics. optics] (2010)

/ Hiepko K. (Univ. Münster), Bastek J. (Univ. Münster), Schlesiger G. (Univ. Münster), Würz R., Stolwijk N.A. (Univ. Münster); **Diffusion and incorporation of Cd in solar-grade Cu(In,Ga)Se₂ layers**; Applied Physics Letters 99 (2011), 234101

/ Höfling H., Salzer J., Schmidt M.; **Die strategische Stromreserve mit Erneuerbaren-Quote als Instrument der nationalen Versorgungssicherheit?** Energiewirtschaftliche Tagesfragen 07/2011

/ Jackson P., Hariskos D., Lotter E., Paetel S., Würz R., Menner R., Wischmann W., Powalla M.; **New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20 %**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications 19 (2011) 894–897

/ Jehl Z. (IRDEP), Erfurth F. (IRDEP), Naghavi N. (IRDEP), Lombez L. (IRDEP), Gerard I. (ILV), Bouttemy M. (ILV), Tran-Van P. (ILV), Etcheberry A. (ILV), Voorwinden G. (WERes), Dimmler B. (WERes), Wischmann W., Powalla M., Guillemoles J.F. (IRDEP), Lincot D. (IRDEP); **Thinning of CIGS solar cells: Part II: Cell characterizations**; Thin Solid Films 519 (2011) 7212–7215

/ Kind C. (KIT), Feldmann C. (KIT), Quintilla A., Ahlswede E.; **Citrate-capped Cu₃₁In₉ nanoparticles and its use for thin-film manufacturing of CIS solar cells**; Chemistry of Materials 2011, 23, 5269–5274

/ Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Krüger P., Arlt T. (HZB), Haußmann J., Klages M., Riesemeier H. (BAM), Hartnig C. (Chemetall), Scholta J., Banhart J. (HZB); **Investigation of 3D water transport paths in gas diffusion layers by combined in-situ synchrotron X-ray radiography and tomography**; Electrochemistry Communications 13 (2011) 1001–1004

/ Menner R., Hariskos D., Linß V. (von Ardenne), Powalla M.; **Low-cost ZnO:Al transparent contact by reactive rotatable magnetron sputtering for Cu(In,Ga)Se₂ solar modules**; Thin Solid Films 519 (2011) 7541–7544

/ Mönig H. (Yale Univ. / HZB), Kaufmann C.A. (HZB), Fischer Ch.-H. (HZB / FU Berlin), Grimm A. (HZB), Caballero R. (HZB / UA Madrid), Johnson B. (HZB), Eicke A., Lux-Steiner M.Ch. (HZB / FU Berlin), Lauer mann I. (HZB); **Gallium gradients in chalcopyrite thin films: Depth profile analyses of films grown at different temperatures**; Journal of Applied Physics 110 (2011), 093509

/ Musiol F., Nieder T., van Mark K.; **Mit dem Aufschwung Schritt gehalten: Entwicklung der erneuerbaren Energien im Jahr 2010**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 09/2011

/ Reinhard M. (KIT), Hanisch J., Zhang Z. (KIT), Ahlswede E., Colsmann A. (KIT), Lemmer U. (KIT); **Inverted organic solar cells comprising a solution-processed cesium-fluoride interlayer**; Applied Physics Letters 98 (2011) 053303

/ Rousset J. (IRDEP), Saucedo E. (IRDEP), Herz K., Lincot D. (IRDEP); **High efficiency CIGS-based solar cells with electrodeposited ZnO:Cl as transparent conducting oxide front contact**; Progress in Photovoltaics: Research and Applications 19 (2011) 537–546

/ Seidenberger K., Wilhelm F., Scholta J.; **Monte-Carlo-Simulation – Wasserhaushalt in der GDL einer PEM-Brennstoffzelle**; H2wei, 11 (2011) Ausgabe zur Hannover Messe, April 2011, ISSN 1862–393X

/ Specht M., Zuberbühler U., Baumgart F., Feigl B., Frick V., Stürmer B., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (SolarFuel); **Storing renewable energy in the natural gas grid – methane via power-to-gas (P2G): A renewable fuel for mobility**; Proceedings of the 6th Conference "Gas-Powered Vehicles – The Real and Economical CO₂-Alternative", Stuttgart, 26–27 Oct. 2011, p. 98

/ Staiß F., Musiol F., Schott B., Höfling H.; **Speichertechnologien im Energiemarkt der Zukunft**; Schütz, Klusmann (Hrsg.): Die Zukunft des Strommarktes, Ponte Press Bochum, 2011

/ Thrän D. (DBFZ), Pfeiffer D. (DBFZ), Gröber A. (DBFZ), Steiert S., Zeller V. (DBFZ), Weiser C. (TLL Thüringen), Deumelandt P. (Repro Agrar), Zimmermann P. (Agnion), Wimmer W. (Biomassehof Achenal); **Optimisation of the use of biomass for energy production (Optimierung der energetischen Biomassenutzung) – a funding programme introduces itself**; Energy Sustainability and Society 1:7 (2011)

/ Witte W.; **Mikroskopische Inhomogenitäten und optoelektronische Eigenschaften von Cu(In,Ga)Se₂-Schichten**; Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2011

/ 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**; Thin Solid Films 519 (2011) 7549–7552

/ Würz R., Eicke A., Kessler F., Rogin P. (LNM), Yazdani-Assl O. (LNM); **Alternative sodium sources for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells on flexible substrates**; Thin Solid Films 519 (2011) 7268–7271

/ Zhang Z. (KIT), Tang X. (KIT), Lemmer U. (KIT), Witte W., Kiowski O., Powalla M., Hölscher H. (KIT); **Analysis of untreated cross sections of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells with varying Ga-content using Kelvin probe force microscopy**; Applied Physics Letters 99 (2011) 042111

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

/ Adler T. (Univ. Darmstadt), Witte W., Hariskos D., Powalla M., Klein A. (Univ. Darmstadt); **Deposition dependent band offsets at the Cu(In,Ga)Se₂/buffer interfaces**; MRS 2011 Spring Meeting, San Francisco, 25–29 April 2011

/ Adler T. (TU Darmstadt), Witte W., Hariskos D., Powalla M., Klein A. (TU Darmstadt); **Process dependence of band alignment at Cu(In,Ga)Se₂ buffer interfaces**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Adler T. (TU Darmstadt), Witte W., Hariskos D., Powalla M., Klein A. (TU Darmstadt); **Time-dependent capacitance voltage measurements on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Arlt T. (HZB), Grothausmann R. (HZB), Manke I. (HZB), Markötter H. (HZB), Krüger P., Haußmann J., Hilger A. (HZB), Kardjilov N. (HZB), Hartnig C. (Chemetall), Kupsch A. (BAM), Lange A. (BAM), Hentschel M. (BAM), Wippermann K. (FZJ), Banhart J. (HZB); **Tomografische Methoden für die Brennstoffzellenforschung**; DGFZP-Jahrestagung 2011, Bremen, 30.5.–1.6.2011

/ Axmann P., Memm M., Kirchmann M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Mixed transition metal lithium phospho olivines – Structural and electrochemical aspects**; IBA 2011, Cape Town, 12–15 April 2011

/ Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M., Tillmetz W.; **Influence of particle size and morphology on LIB cathode performance**; German-Russian Symposium, Ulm, 3–4 May 2011

/ Bastek J. (Univ. Münster), Hiepko K. (Univ. Münster), Würz R., Stolwijk N. (Univ. Münster); **Diffusion of Cd and Zn in CIGS/Mo/glass layer structures examined by the use of radiotracers**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E.; **Shunt resistance effects in organic tandem solar cells**; EMRS 2011 Spring Meeting, Nice, 9–13 May 2011

/ Bauer G.H. (Univ. Oldenburg), Heise S.J. (Univ. Oldenburg), Knabe S. (Univ. Oldenburg), Neumann O. (Univ. Oldenburg), Brüggermann R. (Univ. Oldenburg), Hariskos D., Witte W.; **Depth dependent optoelectronic properties of Cu(In,Ga)(Se,S), with lateral resolution in the micron/submicron scale from luminescence studies**; Energy Procedija 10 (2011) 208–212 (EMRS 2011 Spring Meeting, Nice, 9–13 May 2011)

/ Bickert S. (FZJ), Günther C., Krug S., Schott B., Späth V., Kuhn R., Döring H.; **Total Costs of Ownership von Elektrofahrzeugen unter besonderer Berücksichtigung von Batteriekosten, Werteverlust und Batterialterung**; 3. Symposium 2011 „Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“, Aachen, 1.–2.3.2011

// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

/ Binder J., Marcel J.C. (Tenesol), Schmiegel A.U. (voltwerk), Thomas U. (EON), Martin N. (INES-CEA), Jehoulet C. (Saft), Landau M. (FhG-IWES), Mohring H.-D.; **The SOL-ION system: Prototype development in French Overseas and Southern German field trial locations and logged parameters for PV storage system at home locations**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Bisle G., Fleischhammer M., Wachtler M., Weirather-Köstner D., Wohlfahrt-Mehrens M., Jutz G. (SGL), Hammer C. (SGL), Wurm C. (SGL); **Effect of electrolyte composition and state of charge on the thermal behaviour of different graphite anodes for Li-ion batteries**; AABC – Advanced Automotive Batteries Europe, Mainz, 6–10 June 2011

/ Bonucci A. (SAES), Gallina P. (SAES), Amiotti M. (SAES), Hiss S. (Kuraray), Salomon O., Wischmann W.; **Thin film CIGS PV modules with more than 3000 hours damp heat stability: breakthrough time property of the B-Dry®1 edge sealant and its characterization**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Bonnuci A. (SAES), Gallina P. (SAES), Amiotti M. (SAES), 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**; Polymers in Photovoltaics, Köln, 12–14 April 2011

/ Bonnuci A. (SAES), van der Wel R. (SAES), Gallina P. (SAES), Amiotti M. (SAES), Hiss S. (Kuraray), Salomon O., Wischmann W.; **An edge sealing “Getter” tape for ultra-long lifetime (up to 3000 hours) of thin film CIGS PV modules**; NREL: 2011 Photovoltaic Module Reliability Workshop, Denver, 16–17 Feb. 2011

/ Brellochs J., Marquard-Möllenstedt T., Steiert S., Specht M.; **Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen der AER-Biomassevergasung**; DGMK-Fachtagung Velen X, Rotenburg a. d. F., 19.–21.3.2011

/ Brunner S. (HTS), Zajac K. (HTS), Nadler M. (HTS), Seifart K. (HTS), Kaufmann C.A. (HZB), Caballero R. (HZB), Schock H.-W. (HZB), Hartmann L. (Solarion), Otte K. (Solarion), Rahm A. (Solarion), Scheit C. (Solarion), Zachmann H. (Solarion), Kessler F., Würz R., Schülke P. (DLR); **Recent progress towards space applications of thin film solar cells – The German joint project “Flexible CIGSe Thin Film Solar Cells for Space Flight” and OOV**; ESPC 2011 9th European Space Power Conference, Cote d’Azur, 6–10 June 2011

/ Caballero R. (HZB), Kaufmann C.A. (HZB), Rissom T. (HZB), Eicke A., Manganiello P. (HZB), Schock H.-W. (HZB); **Evaluating different Na-incorporation methods for low temperature grown CIGSe thin film on polyimide foils**; 37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Seattle, 19–24 June 2011

/ Colsmann A. (KIT), Pütz A. (KIT), Lemmer U. (KIT), Hanisch J., Bauer A., Ahlswede E.; **Semi-transparent polymer photovoltaic devices with good transparency color perception and color rendering properties**; EMRS 2011 Spring Meeting, Nice, 9–13 May 2011

/ Czolk J. (KIT), Puetz A. (KIT), Vogeler H. (KIT), Kutsarov D. (KIT), Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E., Lemmer U. (KIT), Colsman A. (KIT); **Semi-transparent polymer photovoltaic devices with good transparency color perception and color rendering properties**; 2nd International Conference and Exhibition Organic Photovoltaics, Würzburg, 21 Sept. 2011

/ Eicke A., Ciba T., Hariskos D., Menner R., Tschamber C., Witte W.; **Depth profiling with SIMS and SNMS on Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells with (Zn,Mg)O/Zn(S,O) buffer layers**; ECASIA 2011 – 14th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, Cardiff, 4–9 Sept. 2011

/ Enz S., Messerschmidt M., Scholta J.; **Untersuchungen an PEM-Brennstoffzellen unter hochdynamischen Betriebsbedingungen**; ANSYS Conference & CADFEM Users’ Meeting (ACUM), Stuttgart, 19.–21.10.2011

/ Friedlmeier T., Quintilla A., Ahlswede E., Romanyuk Y.E. (EMPA), Uhl A.R. (EMPA), Tiwari A.N. (EMPA), Baumann R. (TUC), Kololuoma T. (VTT), McAdam C. (Xennia), Kaelin M. (Flisom), Cemernjak M. (WERes), Van Genechten D. (Umicore), Stassin F. (Umicore); **NOVA-CIGS: Non-vacuum processes for deposition of the CIGS active layer in PV cells**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Geyer D.; **Accelerated testing of the behaviour of thin-film modules under system voltages**; 1st Inverter and PV System Technology Forum 2011, Berlin, 24–25 Jan. 2011

/ Günther C., Krug S., Schott B., Kuhn R., Bickert S. (FZJ), Jossen A. (TUM); **Modellierung und Simulation von Alterung und Wertverlust eines Li-Ionen-Akkumulators unter Berücksichtigung heutiger und zukünftiger Eigenschaften**; 2. Automobiltechnisches Kolloquium, München, 11.–12.4.2011

/ Hanisch J., Wahl T., Bauer A., Müller D., Ahlswede E.; **Highly efficient polymer bulk heterojunction tandem solar cells with ZnO-based recombination layer**; EMRS 2011 Spring Meeting, Nice, 9–13 May 2011

/ Hariskos D., Menner R., Jackson P., Paetel S., Wischmann W., Powalla M., Bürkert L. (WERes), Schnell B. (WERes), Kolb T. (WERes), Oertel M. (WERes), Dimmler B. (WERes), Fuchs B. (WS); **Progress in development of Cu(In,Ga)Se₂/Zn(S,O)/(ZnMg)O/ZnO:Al solar modules**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Haußmann J., David N. (Univ. of Victoria), Klages M., Arlt T. (HZB), Markötter H. (HZB), Djilali N. (Univ. of Victoria), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Combined relative humidity and water content measurements in PEM fuel cells with optical fibre sensors and synchrotron X-ray radiography**; Hydrogen and Fuel Cell Conference (HFC) 2011, Vancouver, 15–18 May 2011

/ Igalson M. (WUT), Urbanijk A. (WUT), Stankiewicz K. (WUT), Tomassini M. (CNRS), Barreau N. (CNRS), Spiering S.; **Barriers for current transport in the CIGS structures**; 37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Seattle, 19–24 June 2011

/ Kaymaksiz S., Wachtler M., Wilhelm F., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Redox-Shuttle-Additive als reversibler elektrochemischer Überladeschutz für Lithium-Ionen-Batterien**; GDCh-Wissenschaftsforum 2011, Bremen, 4.–7.9.2011

/ Kaymaksiz S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electrochemical analysis of redox shuttle additives for Li-ion batteries with voltametric techniques using stationary and rotating (hydrodynamic) electrodes**; 220th Meeting of the Electrochemical Society, Boston, 9–14 Oct. 2011

/ Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Hartnig C., Tschernych I. (Chemetall), Wietelmann U. (Chemetall); **Electrochemical stability of lithium saliylato-borates for use as electrolyte salts in Li-ion batteries**; 220th Meeting of the Electrochemical Society, Boston, 9–14 Oct. 2011

/ Kessler F., Würz R., Spiering S., Brémaud D. (Flisom), Ruth M. (Flisom), Ziltener R. (Flisom), Kaelin M. (Flisom), Tiwari A.N. (EMPA), Buecheler S. (EMPA), Chirila A. (EMPA), Pianezzi F. (EMPA), Blösch P. (EMPA), van Krevel J. (Tata), Schwagereit M. (Tata), Palaniswamy G. (Tata), Onink M. (Tata), Schlegel C. (Pemco), Efimenko S. (Pemco), Dimmler B. (WS), Wächter R. (WS), Bolt P.J. (TNO), de Graaf D. (TNO), Hovestad A. (TNO), Grob F. (TNO), Zabierowski P. (WUT), Urbaniak A. (WUT), Igalson M. (WUT); **New concepts for high efficiency and low cost in-line manufactured flexible CIGS solar cell (“hipoCIGS”)**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Klugius I., Friedlmeier T., Haug V., Quintilla A., Ahlswede E.; **Sputtering of metallic alloy precursors for CIGS solar cells from a single Cu-In-Ga ternary target**; EMRS 2011 Spring Meeting, Nice, 9–13 May 2011

/ Könné N. (Univ. Oldenburg), Knabe S. (Univ. Oldenburg), Witte W., Hariskos D., Meeder A. (Sulfurcell), Bauer G.H. (Univ. Oldenburg); **Excess carrier depths profiles in Cu(In,Ga)S₂ and Cu(In,Ga)Se₂ absorbers from spectral photoluminescence**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Köntje M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigations on structure and electrochemistry of magnesium substituted lithium transition metal phospho olivines (LiMg_xMn_{1-x}PO₄)**; LIBD – Lithium Batteries Discussion 2011, Arcachon, 12–17 June 2011

/ Krug S., Kuhn R., Günther C., Späth V., Auer M. (Univ. Stuttgart), Wiedemann J. (Univ. Stuttgart), Döring H.; **Dynamische Simulation von Hochvolt-Traktionsbatterien**; 12. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik, Stuttgart, 13.–14.3.2011

/ Kuhn R., Günther C., Stumpff S., Späth V., Döring H.; **Gegenüberstellung unterschiedlicher Parametrisierungsansätze für Batteriemodelle**; 3. Symposium 2011 „Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“, Aachen, 1.–2.3.2011

/ Linß, V. (von Ardenne), Strümpfel J. (von Ardenne), Fleischer T. (von Ardenne), Menner R., Friedlmeier T., Wischmann W., Niesen T. (Avancis), Visbeck S. (Avancis), Palm J. (Avancis); **ZnO:Al for CIGS solar modules deposited by reactive sputtering from rotatable magnetron**; 54th Annual SVC Technical Conference, Society of Vacuum Coaters, Chicago, 16–21 April 2011

/ Macielak K. (WUT), Igalson M. (WUT), Spiering S.; **Comparison of meta-stabilities in CIGS solar cells with In₂S₃ and CdS buffer layers**; 37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Seattle, 19–24 June 2011

/ Markötter H. (HZB), Arlt T. (HZB), Krüger P., Haußmann J., Klages M., Scholta J., Riesemeier H. (BAM), Banhart J. (BAM), Manke I. (HZB); **Synchrotron-Röntgen-Radiographie und -Tomographie einer Brennstoffzelle**; DGfZP-Jahrestagung 2011, Bremen, 30.5.–1.6.2011

/ Meessen M. (Univ. Oldenburg), Neumann O. (Univ. Oldenburg), Heise S.J. (Univ. Oldenburg), Brüggemann R. (Univ. Oldenburg), Witte W., Hariskos D., Bauer G.H. (Univ. Oldenburg); **Spatially resolved photoluminescence and AFM measurements on Cu(In,Ga)Se₂-based thin-film absorbers prepared with different throughput speeds**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Messerschmidt M., Enz S., Klages M., Scholta M.; **Einfluss des Wasserhaushaltes auf die Degradation – Membran und GDL**; 1. Workshop „Lebensdauerprognose für PEM-Brennstoffzellen“, ZBT Duisburg, 14.–15.11.2011

/ Mohring H.-D.; **Felddaten-Auswertung von Dünnschicht-Anlagen**; 7. Anwenderforum: Grundlagen Dünnschicht-Photovoltaik, Bad Staffelstein, 28.2.–1.3.2011

/ Mohring H.-D.; **Operational characterization of thin film PV systems**; 3rd International Conference Thin-Film Photovoltaics, Munich, 7 June 2011

/ Mohring H.-D., Geyer D., Stellbogen D., Schanz O., Knaupp W. (PV-plan); **Auch nach über 20 Jahren ist noch lange nicht Schluss – Langzeiterfahrungen auf dem ZSW-PV-Testfeld**; 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2.–4.3.2011

/ Mohring H.-D., Stellbogen D., Geyer D., Lechner P.; **Comparative assessment of different thin film technologies from outdoor I-V characteristics**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Müller M. (Univ. Magdeburg), Ribbe S. (Univ. Magdeburg), Schwarz T. (Univ. Magdeburg), Betram F. (Univ. Magdeburg), Christen J. (Univ. Magdeburg), Witte W., Hariskos D.; **Investigations of lateral and vertical compositional gradients in Cu(In,Ga)Se₂ by highly spatially, spectrally and time resolved cathodoluminescence spectroscopy**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Müller M. (Univ. Magdeburg), Schwarz T. (Univ. Magdeburg), Hempel T. (Univ. Magdeburg), Betram F. (Univ. Magdeburg), Christen J. (Univ. Magdeburg), Witte W., Hariskos D., Powalla M.; **Highly spatially, spectrally and time-resolved cathodoluminescence studies of Cu(In,Ga)Se₂**; MRS 2011 Spring Meeting, San Francisco, 25–29 April 2011

/ Munuera C. (MPI/CSIC), Bauer A., Ahlswede E., Sanyal M. (MPI/Univ. Stuttgart), Hanisch J., Dosch H. (MPI/Univ. Stuttgart), Barrena E. (MPI/CSIC); **Insights on the electrostatic properties of P₃HT-PCBM blends with KPM**; ECME 2011, European Conference on Molecular Electronics, Barcelona, 7–10 Sept. 2011

// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications

/ Neumann O. (Univ. Oldenburg), Heise S.J. (Univ. Oldenburg), Brüggermann R. (Univ. Oldenburg), Meessen M. (Univ. Oldenburg), Witte W., Hariskos D., Bauer G.H. (Univ. Oldenburg); **Cu(In,Ga)Se₂-based thin-film systems with different absorber thickness: Spatially resolved photoluminescence and AFM measurements**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Ott T. (FH Ulm), Mack P. (FH Ulm), Trudel F. (FH Ulm), Schulz Y. (FH Ulm), Walter T. (FH Ulm), Hariskos D., Kiowski O., Schäffler R. (WERes); **Accelerated ageing and luminescence of CIGS solar cells**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Persson J., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **In-situ diametry study of anion intercalation into graphite from organic electrolytes**; CESEP – 4th International Conference on Carbons for Energy Storage / Conversion and Environment Protection, Vichy, 25–29 Sept. 2011

/ Pfanzelt M., Jacke S., Kubiak P., Jägermann W., Wohlfahrt-Mehrens M.; **SEI formation on TiO₂ rutile – an XPS study**; ECS Meeting, Montreal, 1–6 May 2011

/ Pfanzelt M., Kubiak P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Nanosized TiO₂: Promising alternative anode materials?** ICMAT 2011, Singapore, 26 June – 1 July 2011

/ Pofahl S., Gogel V., Jörissen, L.; **Simulation of the DMFC kinetics via three Butler-Volmer equations**; FDFC - Fundamentals and Developments of Fuel Cells, Grenoble, 19–21 Jan. 2011

/ Powalla M.; **Dünnschicht-Chalkogenid-Solarzellen: Überblick und Forschungsfelder**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Powalla M.; **Introduction to thin-film photovoltaics**; 3rd International Conference Thin-Film Photovoltaics, Munich, 7 June 2011

/ Powalla M.; **Kupfer-Indium-Diselenid-Technologie**; 7. Anwenderforum: Grundlagen Dünnschicht-Photovoltaik, Bad Staffelstein, 28.2.–1.3.2011

/ Powalla M., Hariskos D., Jackson P., Kessler F., Paetel S., Wischmann W., Witte W., Würz R.; **CIGS solar cells with efficiencies > 20 %: Current status and new developments**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Reinhard M. (KIT), Hanisch J., Zhang Z. (KIT), Ahlswede E., Colsmann A. (KIT), Lemmer U. (KIT); **Solution-processed cesium fluoride interlayers for inverted polymer solar cells**; HOPV, 3rd Hybrid and Organic Photovoltaics Conference, Valencia, 15–18 May 2011

/ Ribbe S. (Univ. Magdeburg), Müller M. (Univ. Magdeburg), Betram F. (Univ. Magdeburg), Christen J. (Univ. Magdeburg), Hempel T. (Univ. Magdeburg), Witte W., Hariskos D.; **Kathodolumineszenz-Mikroskopie von polykristallinen Cu(In,Ga)Se₂-Absorberschichten**; DPG-Frühjahrstagung der Sektion AMOP (SAMOP) und der Sektion Kondensierte Materie (SKM), Dresden, 13.–18.3.2011

/ Schmiegel A.U. (voltwerk), Linhart A. (voltwerk), Jehoulet C. (Saft), Schuh H. (Saft), Landau M. (FhG-IWES), Braun M. (FhG-IWES), Büdenbender K. (FhG-IWES), Sauer D.U. (ISEA, RWTH), Magnor D. (ISEA, RWTH), Binder J., Mohring H.-D.; **The SOL-ION system: Realizing safety and efficiency for a PV storage system**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Scholta J., Schätzle M., Kabza A., Pawlik M. (Viessmann), Jörissen L.; **Long term operation of PEFC stacks for stationary applications**; 1. Workshop „Lebensdauerprognose für PEM-Brennstoffzellen“, ZBT Duisburg, 14–15 Nov. 2011

/ Scholta J., Schätzle M., Pawlik J. (Viessmann), Chmielewski N. (Viessmann), Jörissen L.; **Long term operation of PEFC stacks for stationary applications**; 2nd International Workshop on Degradation Issues of Fuel Cells, Thessaloniki, 21–23 Sept. 2011

/ Scholta J., Wilhelm F., Seidenberger K., Tillmetz W.; **Investigations on the morphology and water inventory of GDLs using a μ -computer tomography and Monte Carlo modelling**; Fuel Cell Seminar, Orlando, 31 Oct. – 3 Nov. 2011

/ Seidenberger K., Wilhelm F., Schmitt T., Scholta J.; **Analysis of water cluster formation within PEMFC GDLs using a 3 D Monte Carlo model**; FDFC – Fundamentals and Developments of Fuel Cells, Grenoble, 19–21 Jan. 2011

/ Specht M.; **Impulsvortrag: Aktueller Stand der Power-to-Gas-Technologie**; Power-to-Gas-Erdgasinfrastruktur als Energiespeicher, Bundesnetzagentur / Fraunhofer IWES, Auditorium Friedrichstraße, Berlin, 22.11.2011

/ Specht M., Sterner M. (IWES); **Regeneratives Methan als Schlüssel-speichermedium in einem künftigen Erneuerbare-Energien-System**; Internationale Anwenderkonferenz für Biomassevergasung, Messe Stuttgart, 11.2.2011

/ Specht M., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (SolarFuel); **Erzeugung von Erdgassubstitut aus biogenen Ressourcen**; Perspektiven biogener Gase in Baden-Württemberg, Haus der Wirtschaft, Stuttgart, 4.7.2011

/ Specht M., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Waldstein G. (SolarFuel); **Power-to-Gas (P2G): Prozessentwicklung und Ergebnisse der 25-kW_e-Versuchsanlage**; gat 2011 – „Technologie prägt Markt“, Diskussionsforum „Erdgas aus Ökostrom“, CCH, Hamburg, 25.10.2011

/ Spiering S., Kessler F., Wischmann W., Powalla M.; **Indium sulphide buffer layers by in-line evaporation for CIGS thin film devices**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Staiß F., Leprich U. (IZES), O'Sullivan M. (DLR); **Ökonomische Aspekte: Chancen, Märkte, Arbeitsplätze**; FVEE-Jahrestagung „Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem“, Berlin, 12.–13.10.2011

/ Stellbogen D., Mohring H.-D.; **Vergleichende Freilandcharakterisierung von PV-Modulen in Europa**; 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2.–4.3.2011

/ Stumpp S., Phan M., Günther C., Kuhn R.; **Bestimmung thermischer Parameter eines orts aufgelösten thermischen Batteriemodells für Lithium-Ionen-Batterien**; 3. Symposium 2011 „Kraftwerk Batterie – Lösungen für Automobil und Energieversorgung“, Aachen, 1.–2.3.2011

/ Theil S., Fleischhammer M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Thermal behaviour of LiCoPO₂ as cathode material for lithium ion batteries**; 220th Meeting of the Electrochemical Society, Boston, 9–14 Oct. 2011

/ Uhl A.R. (EMPA), Romanyuk Y.E. (EMPA), Tiwari A.N. (EMPA), Friedlmeier T., Ahlswede E., van Genechten D. (Umicore), Stassin F. (Umicore); **Cu(In,Ga)Se₂ absorber formation from nanoparticle dispersions for thin-film solar cells**; EMRS 2011 Spring Meeting, Nice, 9–13 May 2011

/ Wachtler M., Bisle G., Fleischhammer M., Weirather-Köstner D., Wohlfahrt-Mehrens M., Jutz G. (SGL), Hammer C. (SGL), Wurm C. (SGL); **Comparison of thermal safety behaviour of various graphite anodes from Li-ion cells using combined DSC-TG-MS studies**; Bunsenkolloquium 2011: Grenzflächen in Lithium(ionen)batterien, Goslar, 24.–25.3.2011

/ Wachtler M., Bisle G., Fleischhammer M., Weirather-Köstner D., Wohlfahrt-Mehrens M., Jutz G. (SGL), Hammer C. (SGL), Wurm C. (SGL); **Thermal analysis of graphite anodes from Li-ion cells**; CESEP – 4th International Conference on Carbons for Energy Storage / Conversion and Environment Protection, Vichy, 25-29 Sept. 2011

/ Wachtler M., Weirather-Köstner D., Wohlfahrt-Mehrens M., Rehme C. (SGL), Jutz G. (SGL), Wurm C. (SGL); **Influence of non-ionic surfactants on electrochemical behaviour of graphite anodes in Li-ion batteries**; 220th Meeting of the Electrochemical Society, Boston, 9–14 Oct. 2011

/ Wilhelm F., Seidenberger K., Scholta J., Pauchet J. (CEA), Donath S. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Mecke K. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Kehrwald D. (Opel), Rensink D. (Opel); **Multi-scale fuel cell modelling within the EU project DECODE: Interactions of GDL degradation and water inventory**; 2nd International Workshop on Degradation Issues of Fuel Cells, Thessaloniki, 21–23 Sept. 2011

/ Wilka M., Stern R., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Cell balancing: comparison between half-cell, T-full-cell, pouch-cell with reference electrode, round-cell (18650) with reference electrode**; AABC – Advanced Automotive Batteries Europe, Mainz, 6–10 June 2011

/ Witte W., Eicke A., Hariskos D., Powalla M.; **Characterization of the ZnS/(Zn,Mg)O buffer system in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells by means of SIMS and SNMS**; MRS 2011 Spring Meeting, San Francisco, 25–29 April 2011

/ Witte W., Hariskos D., Eicke A., Menner R., Kiowski O., Powalla M.; **Influence of annealing on Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells with ZnS/(Zn,Mg)O buffers: Interdiffusion and electrical properties**; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, 5–9 Sept. 2011

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Energiespeicher für Elektromobilität**; DPG-Arbeitskreis Energie, Dresden, 14.3.2011

/ Wohlfahrt-Mehrens M.; **Lithium-Ionen-Batterien: Stand und Perspektiven**; Stationäre Anwendung und Industriebatterien, Wiesbaden, 18.–19.5.2011

/ Wohlfahrt-Mehrens M., Axmann P., Memm M., Köntje M.; **Routes to improve LiMnPO₂ for application in lithium ion batteries**; AABC – Advanced Automotive Battery Conference, Pasadena, 24–28 Jan. 2011

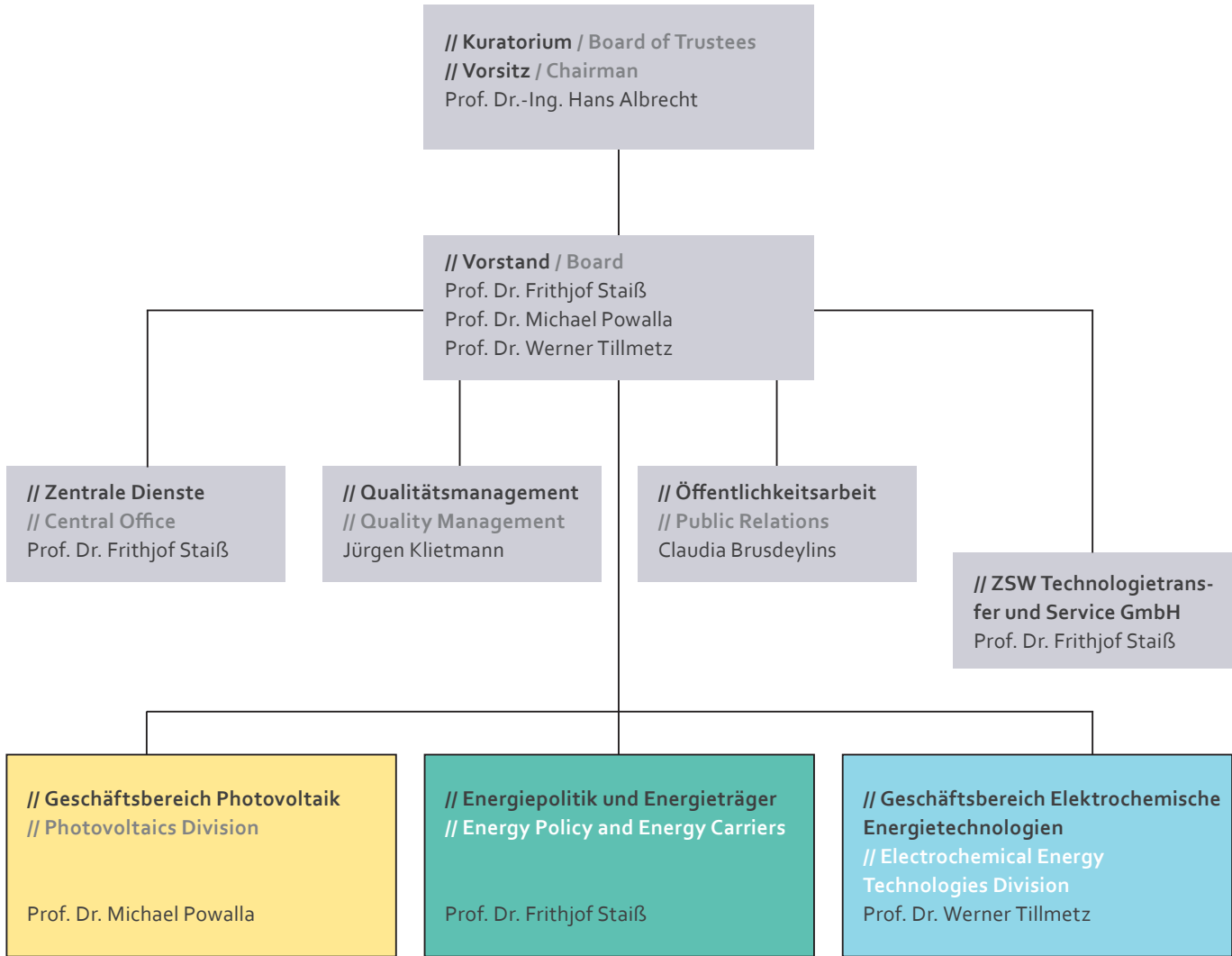
/ Wohlfahrt-Mehrens M., Pfanzelt M., Kubiak P., Marinaro M., Marassi R.; **Low temperature behaviour of TiO₂ rutile as negative electrode material for lithium-ion batteries**; ECS Meeting, Montreal, 1–6 May 2011

/ Zhang Z. (KIT), Tang X. (KIT), Lemmer U. (KIT), Kiowski O., Powalla M., Hölscher H. (KIT); **Comparison of the potential distributions at grain boundaries on the surface and in the depth of the absorber in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; 37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Seattle, 19–24 June 2011

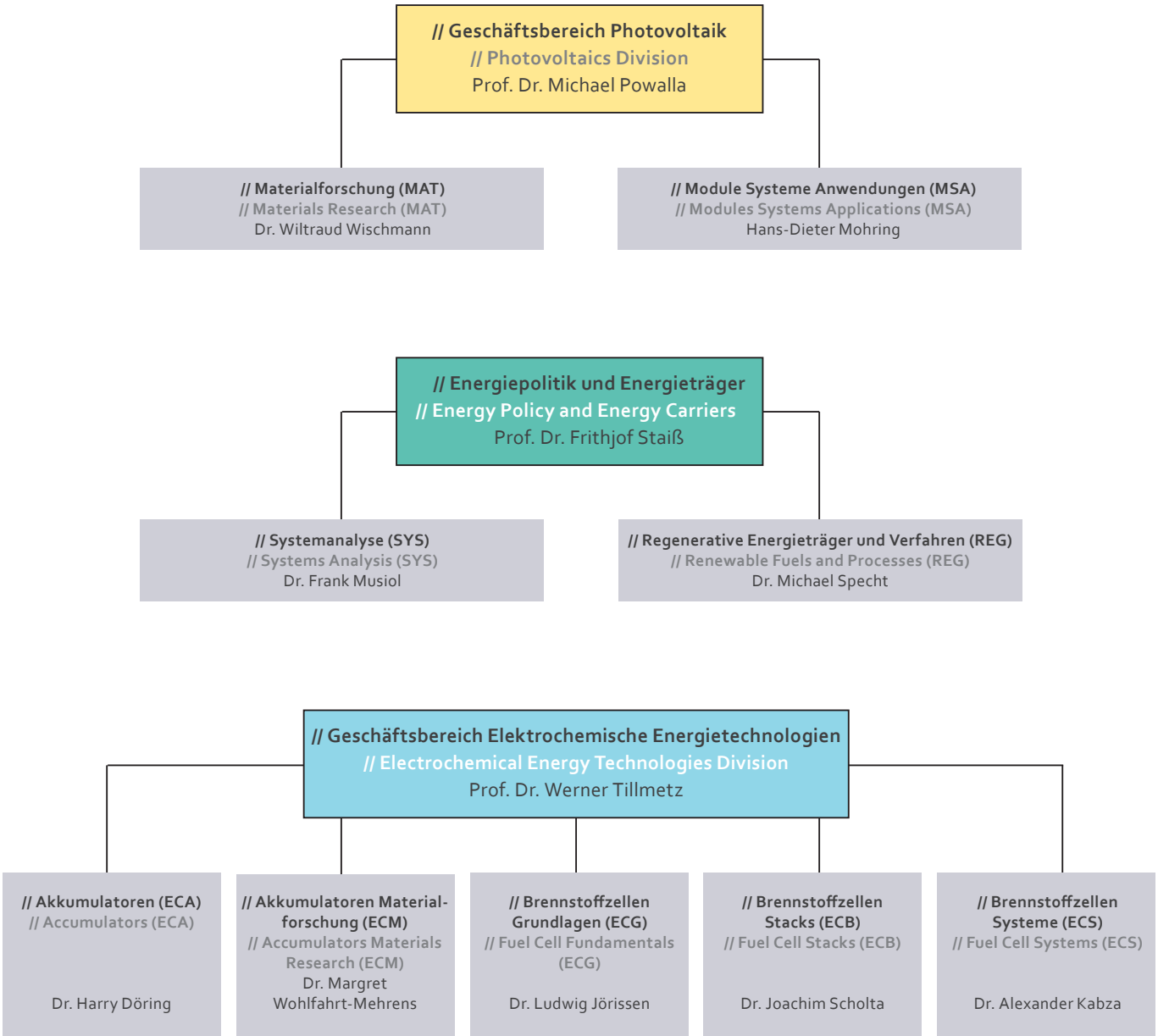
// Organigramme

Organisational Charts

// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart



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



// Standorte Locations



// Stuttgart



Industriestraße 6
70565 Stuttgart

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

// Widderstall



Widderstall 14
89188 Merklingen

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

// Ulm



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

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

// Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

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

// Abkürzungen
Abbreviations

// Firmen, Institute, Institutionen
// Companies, Institutes, Institutions

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BSW	Bundesverband Solarwirtschaft
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
CISC	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique, France
CRIC	Centre de Recerca i Investigació de Catalunya
DBFZ	Deutsches BioMasseForschungsZentrum
DGfZP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DPG	Deutsche Physikalische Gesellschaft
ECS	Electrochemical Society
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFW	Institut für Festkörper- und Werkstoff-Forschung
ILV	Institut Lavoisier de Verdun
INES	Institut National de l'Énergie Solaire
InnBW	Innovationsallianz Baden-Württemberg
IRDEP	Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque
IREC	Catalonia Institute for Energy Research
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISEA	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystem-technik
IZES	Institut für Zukunfts-Energiesysteme
KEA	Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien
LNM	Leibniz-Institut für Neue Materialien
LPN	Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, CNRS
MPI-E	Max-Planck-Institut für Eisenforschung
MPI-IS	Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme
MRS	Materials Research Society
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PVIC	Center for Photovoltaics Innovation and Commercialisation
TFS	Thermo Fisher Scientific

TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TUC	Technische Universität Chemnitz
TUM	Technische Universität München
UA	Universidad Autónoma (de Madrid)
UBW	Universität der Bundeswehr
VDA	Verband der Automobilindustrie
WERes	Würth Elektronik Research GmbH
WS	Würth Solar
WUT	Warsaw University of Technology
ZBT	Zentrum für BrennstoffzellenTechnik

// Technische Begriffe
// Technical Terms

AFM	Atomic Force Microscope / Rasterkraftmikroskop
a-Si	Amorphes Silizium
B-CHP	Block-type Combined Heat and Power
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCPP	Combined-Cycle Power Plant
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHP	Combined Heat and Power
c-Si	kristallines Silizium
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EV	Electric vehicle/Elektrofahrzeug
EVA	Ethylene Vinyl Acetate
F&E	Forschung und Entwicklung
FEM	Finite-Elemente-Methode
GDL	Gas Diffusion Layer/Gasdiffusionsschicht
GuD	Gas und Dampf
HT	Hochtemperatur/high temperature
KPM	Kelvin Probe Microscopy
LPG	Liquefied Petroleum/Propane Gas
MT	Mitteltemperatur/medium temperature
OOV	On-Orbit Verification
PEFC	Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PV	Photovoltaik
R&D	Research and Development
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SEM	Scanning Electron Microscope
SIMS	Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie/Secondary Ion Mass Spectrometry
SNG	Substitute Natural Gas/Erdgassubstitut
SNMS	Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie/Secondary Neutral Mass Spectrometry
XRD	X-Ray Diffraction/Röntgenbeugung
μ-CT	Mikro-Computertomographie

// Mitgliedschaften
// ZSW is a member of



EUREC	European Renewable Energy Centres Agency
ZfES	Zentrum für Energieforschung an der Universität Stuttgart
Kinet	Kompetenz- und Innovationszentrum Nachhaltige Energie-Technik e.V. Cluster Windenergie BW
EWEA	European Wind Energy Association
DVG	Deutsche Vakuum-Gesellschaft
EFDS	Europäische Forschungsgesellschaft Dünne-Schichten e.V. Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft
DGMK	Deutsche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien
BzA-BW	Brennstoffzellen-Allianz Baden-Württemberg
DWV	Deutscher-Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
ECS	Elektrochemical Society
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
N.ERGHY	New European Research Grouping
WBzU	Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V.

// Impressum
// Imprint

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

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

E-mail: info@zsw-bw.de
Internet: www.zsw-bw.de

// Redaktion Editors
Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Gudrun Scherg
Ulrike Zimmer

// Koordination Coordination
Karl-Heinz Frietsch



// Layout & Satz Layout & Setting
Sieber & Wolf Werbeagentur
Hofgut Mauer 1
70825 Korntal-Münchingen
www.sieberundwolf.de

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

Stuttgart:

Industriestraße 6
70565 Stuttgart
Fon: +49 (0) 711 78 70-0
Fax: +49 (0) 711 78 70-100
www.zsw-bw.de

Solar-Testfeld Widderstall:

Widderstall 14
89188 Merklingen
Fon: +49 (0) 7337 92 394-0
Fax: +49 (0) 7337 92 394-20
www.zsw-bw.de

Ulm:

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

Ulm eLaB:

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



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