

// **ERGEBNISSE**
RESULTS

2009

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



// Copyright

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

// Copyright

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

// Inhalt

Contents

4	Vorwort / Foreword
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des ZSW-Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	Meilensteine / Milestones
14	Schwerpunktbericht 2009: Speicherung erneuerbarer Energien Focus Report 2009: Renewable Energy Storage
32	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
34	Systemanalyse / Systems Analysis
38	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
42	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
44	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
48	Akkumulatoren / Accumulators
50	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
52	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
54	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
58	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
60	Organisation und Verwaltung / Organisation and Administration
61	Werkstätten, IT und Bauleitung / Workshops, IT and Construction Management
62	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
68	Dokumentation / Documentation
70	Haushaltsentwicklung / Budget Development
72	Personalentwicklung / Staff Development
74	Veröffentlichungen / Publications
78	Organigramm / Organisational Chart
80	Standorte / Locations
82	Abkürzungen / Abbreviations
83	Impressum / Imprint



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Dr.-Ing. Michael Powalla

//Vorwort

Foreword

Im Jahr 2009 wurden wichtige politische Entscheidungen in den Themenfeldern des ZSW getroffen: Mit einer EU-Richtlinie sind die Mitgliedstaaten verpflichtet worden, durch nationale Ziele den Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch der Gemeinschaft bis zum Jahr 2020 auf mindestens 20 % mehr als zu verdoppeln. Dem entspricht die Vorgabe von 18 % für Deutschland, und auch auf Landesebene wurden mit dem Energiekonzept Baden-Württemberg 2020 analoge Ziele gesetzt.

Wichtige Maßnahmen dafür sind auf Bundesebene das Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz und das novellierte Erneuerbare-Energien-Gesetz, wonach bereits 2020 mindestens 30 % des Strombedarfs regenerativ gedeckt werden soll. Bei dem dafür erforderlichen deutlichen Ausbau der Wind- und Solarenergie gilt es jedoch, ihren inhärenten Nachteil der schwankenden Erzeugung auszugleichen. Ein Schlüssel dazu sind neue Speichertechnologien, die sowohl im dezentralen als auch im großtechnischen Maßstab in der Lage sind, Energieangebot und -nachfrage miteinander zu verbinden. Sie bilden den Themenschwerpunkt des vorliegenden Jahresberichtes.

Parallel zum Strom- und Wärmemarkt werden Alternativen im Verkehr vorangetrieben. Mit dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung soll Deutschland international zum Leitmarkt für Elektromobilität entwickelt und die Führungsrolle von Wissenschaft und Automobilindustrie behauptet werden. Eine Schlüsseltechnologie ist auch hier der Energiespeicher.

Energiespeichersysteme sind damit gleichermaßen Voraussetzung und Chance für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien und die Vernetzung mit neuen Formen nachhaltiger Mobilität. Dies deckt sich in idealer Weise mit der Kombination der Forschungsschwerpunkte am ZSW, mit denen wir dazu beitragen möchten, Visionen in die Realität zu führen.

Unser Dank gilt der Landesregierung Baden-Württemberg, den Bundesministerien für Umwelt, für Forschung, für Verkehr und für Wirtschaft sowie der Europäischen Union, unseren Partnern aus Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen sowie den Mitgliedern des Kuratoriums mit seinem Vorsitzenden, Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht, für die nachhaltige Unterstützung unserer Arbeit. Vor allem aber gilt unser Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ZSW, die den unvermeidlichen Druck einer dynamischen Entwicklungsphase mit hohem persönlichem Engagement bewältigen.

In 2009, important political decisions were made in areas relating to ZSW: By setting national targets, a European Directive commits EU Member States to increasing the level of renewable energy used in the EU's total energy consumption to at least 20 % by 2020, thus more than doubling its share. This corresponds to the requirement of 18 % for Germany and, at the federal state level, analogous targets have been set with the Energiekonzept Baden-Württemberg 2020.

In Germany, important measures taken at the national level include the Renewable Energies Heat Act (EEWG) and the amended Renewable Energy Sources Act (EEG), which are intended to enable at least 30 % of the electricity requirements to be already met by renewable energy by 2020. However, in order to achieve the considerable expansion in wind and solar energy that is required, their inherent disadvantage in terms of fluctuating generation must be balanced out. A key to this are new cutting-edge storage technologies that are able to match energy supply to demand not just decentrally but on a large scale. They form the focus of this annual report.

Parallel to the electricity and heating market, alternatives in transport are also being advanced. The intention of the German Government's National Development Plan for Electromobility is to develop Germany internationally into the leading electromobility market and thus claim the lead role both scientifically as well as in the automotive and supply industries. Energy storage also provides a key technology here.

Energy storage systems therefore present both a precondition and an opportunity for the further expansion of renewable energy sources and their integration with new forms of sustainable mobility. This accords perfectly with the combination of research areas at ZSW, with which we would like to help technological and commercial visions become reality.

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, for constantly supporting our work. In particular we would like to extend special thanks to all members of staff at ZSW for mastering the inevitable pressure of such a dynamic development phase through their considerable personal dedication.



// Stiftung Foundation

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

Stiftungszweck ist:

„Forschung und Entwicklung im Bereich der Sonnenenergie und Wasserstofftechnologie, in Abstimmung mit der universitären und außeruniversitären Forschung sowie durch Umsetzung der erarbeiteten Ergebnisse in die industrielle Praxis, zu betreiben und zu fördern.“

(Satzung vom 16. März 1988)

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

The goal of the foundation is

“to conduct and promote research and development in the field of solar energy and hydrogen technology in cooperation with academic and applied research and by transferring the results into industrial application.”

(Statutes of March 16, 1988)

Stifter des ZSW / The founders are

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

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

Unternehmen / Commercial enterprises

- > Aare-Tessin AG für Elektrizität
- > Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Daimler AG
- > Dr. Hans-Jörg Mast
- > EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- > Fichtner GmbH & Co. KG
- > IN-TEC GmbH
- > Martin Fritz Marketing Kommunikation GmbH
- > Messer GmbH
- > Robert Bosch GmbH
- > Schlaich Bergermann und Partner
- > Telefunken Electronic GmbH
- > Verband der Elektrizitätswerke Baden-Württemberg e.V.

// Mitglieder des ZSW-Kuratoriums

Members of the Board of Trustees

Vorsitzender / Chairman

- > Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht

Stellvertreter / Vice Chairman

- > Dr. Ulrich Alkemade

Ministerien / Ministries

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

Universitäten / Universities

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

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

- > Prof. Dr. Dr.-Ing. (habil.) Hans Müller-Steinhagen, Institut für Technische Thermodynamik

Fraunhofer-Gesellschaft

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

Wissenschaft / Science

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

Wirtschaft / Commercial enterprises

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



// Meilensteine 2009
Milestones 2009

// Meilensteine ZSW 2009

Milestones ZSW 2009

Um im nationalen und internationalen Wettbewerb bestehen zu können, kommt es darauf an, besondere Leistungen zu erbringen. So ist es auch 2009 gelungen, in allen Themenschwerpunkten des ZSW, sei es im wissenschaftlich-technischen Bereich oder im Dienstleistungs- und Beratungsbereich, Erfolge zu erzielen und bedeutende Entwicklungen entscheidend voranzutreiben.

Die Meilensteine zeigen die wichtigsten Ergebnisse 2009 in kompakter Form.

In order to successfully compete nationally and internationally, it is important to produce first-class results. In this regard ZSW has once again in 2009 been able to achieve success and drive forward decisive developments in all the spheres it has focussed on, whether in the scientific and technical fields or in the service and consultancy areas.

The milestones show the most important results of 2009 in a compact form.

// Neues Gebäude – ZSW-Zentrum für Batterietechnologie

Die Bundesregierung will Deutschland zum internationalen Leitmarkt für Elektromobilität entwickeln. Leistungsfähige, kostengünstige, sichere und ressourcenschonende Batterien sind dafür der Schlüssel. Dazu besteht ein enormer Entwicklungsbedarf über die gesamte Wertschöpfungskette. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, baut das ZSW seine Kapazitäten massiv aus. In einem Neubau wird die Expertise in den Themenfeldern Materialentwicklung, Produktionsverfahren und Batterietests gebündelt. Ein wesentlicher Schwerpunkt ist der Ausbau der Test-Infrastruktur für Fahrzeugbatterien. Parallel erfolgt der Aufbau einer Laborfertigungslinie für Lithium-Ionen-Zellen von der Pulvervorbehandlung bis zur fertigen Batterie. Die Post-mortem-Analytik wird stark erweitert. Das BMVBS, das BMBF, das Land Baden-Württemberg und die Europäische Union fördern diesen strategisch wichtigen Schritt.

// New building – the ZSW Centre for Battery Technology

The German Government wants to develop Germany into the leading international electromobility market. Powerful, cost-effective and safe batteries that conserve natural resources provide the key to this. However, this requires considerable development across the entire value-added chain. In order to meet this challenge, ZSW is considerably expanding its capacities. Its expertise in the fields of material development, production processes and battery testing are being bundled in a new building. A considerable focus is on expanding the test infrastructure for vehicle batteries. Parallel to this, a laboratory production line for lithium-ion cells is being developed, ranging from the powder pre-treatment to the finished battery. The postmortem analysis is being considerably expanded. The BMVBS, the BMBF, the Federal State of Baden-Württemberg and the European Union are funding this strategically important step.



// Neubau ZSW-Zentrum für Batterietechnologie
// New ZSW Centre for Battery Technology



// Mit Hochspannung zu neuen Batterien

Gemeinsam mit Partnern aus der Industrie ist es gelungen, neuartige Aktivmaterialien für Hochenergiebatterien zu entwickeln, denn die Energiedichte des Speichers bestimmt die Reichweite des Fahrzeugs. Speicherfähigkeit und Spannungslage sind die Stellschrauben für dafür notwendige Kathodenmaterialien. So ist es gelungen, neue 5-Volt-Lithiummetallphosphate mit hoher Kapazität zu realisieren. Erstmals kann mehr als ein Elektron pro Übergangsmetall ausgenutzt werden, was völlig neue Möglichkeiten für höherkapazitive Materialien bei hohen Spannungslagen eröffnet.

// With High Voltage to New Batteries

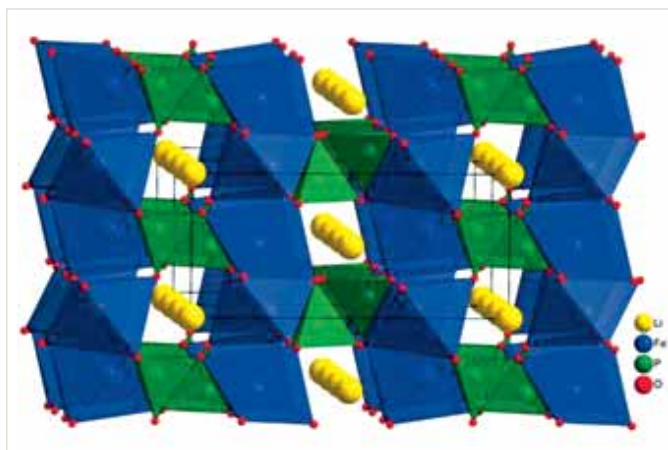
Together with partners from industry, ZSW has succeeded in developing new kinds of active materials for high-energy batteries, as the energy density of the storage medium determines the operating range of vehicles. The storage capacity and voltage level are the key elements for the necessary cathode materials. ZSW has therefore succeeded in realising new 5-volt lithium metal phosphates with high capacity. For the first time it has been possible to utilise more than one electron per transition metal, which offers completely new possibilities for achieving higher-capacity materials with high voltage levels.

// Das spannende Innenleben einer Brennstoffzelle

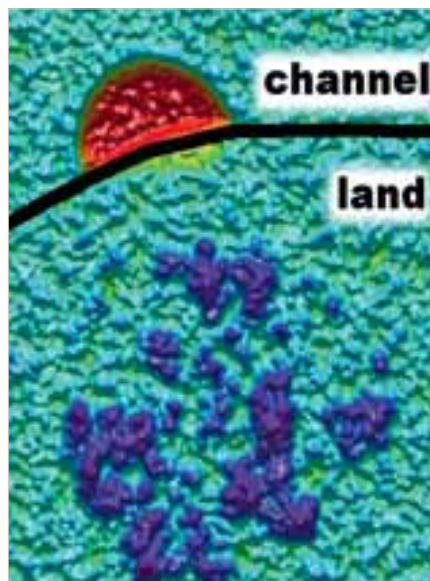
ZSW-Forscher arbeiten an einer faszinierenden Methode, um den Wassertransport in arbeitenden Brennstoffzellen lokal zu analysieren. Mittels Synchrotronradiographie und -tomographie kann das Innere der Brennstoffzelle ähnlich wie bei einer Röntgenaufnahme abgebildet werden – und das im laufenden Betrieb. Diese Methode wurde gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin entwickelt. Die Einblicke in die Brennstoffzelle ermöglichen es, die Entstehung und den Transport von Wasser mit sehr hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu beobachten und zu analysieren. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzellen zu erhöhen und ihre Alterung zu minimieren.

// The Exciting Interior of a Fuel Cell

ZSW researchers are working on a fascinating method to locally analyse the transport of water in operating fuel cells. Using synchrotron radiography and tomography it is possible to visualise the interior of the fuel cell in a manner similar to x-rays – and that during ongoing operation. These methods were jointly developed together with the Helmholtz Centre Berlin. The insight into the fuel cells makes it possible to observe and analyse the creation and transport of water with a very high temporal and spatial resolution. The aim is to enhance the performance of the fuel cells and to minimise their aging.



// Hochvoltolivin
// High-voltage phospho-olivine



// Einblick Wasserverteilung im Zellinnern
// View of the water distribution inside the cell

// Meilensteine ZSW 2009

ZSW Milestones in 2009

// Mit Effizienz zum Europarekord

Eine der wichtigsten Stellschrauben zur notwendigen Kostensenkung in der Photovoltaik ist der Wirkungsgrad. Besonders wichtig ist dies bei Dünnschicht-Solarmodulen. Hier erzielte das ZSW 2009 einen hervorragenden Erfolg: An der industrienahen Durchlaufanlage gelang mit einem modifizierten Beschichtungsprozess eine Steigerung des Wirkungsgrades bei CIGS-Solarzellen auf 19,6 % – ein neuer Europarekord.

// European Record in CIGS Cell Efficiency

One of the most important parameters in achieving the necessary cost reductions for photovoltaics is the efficiency. This is particularly important with thin-film solar modules. Here ZSW achieved an outstanding success in 2009: Using a modified coating process on its industrial-based inline plant, ZSW managed to increase the efficiency of CIGS solar cells to 19.6 % – a new European record.

// Solartracker für beschleunigte Alterungstests

Im Sommer 2009 erweiterte das ZSW das europaweit größte Solar-Testfeld Widderstall mit einem neuen Prüfstand: Der „Solar-Tracker“ wird zweiachsig nachgeführt und konzentriert durch vier große Spiegel das Sonnenlicht in der Modulebene um den Faktor drei. Damit können Modul-Alterungstests im Freiland zeitlich beschleunigt und der Industrie somit schnellere und genauere Vorhersagen über die voraussichtliche Lebensdauer ihrer Module zur Verfügung gestellt werden. Im Zusammenhang mit den erweiterten Labor-Testmöglichkeiten des **Solab** wird so die Qualitätssicherung für Photovoltaikmodule wesentlich verbessert.

// Better Aging for Solar Modules

In the summer of 2009, ZSW enlarged its solar testing facility at Widderstall, which is the largest in Europe, with a new test rig: The solar tracker is a biaxial system that uses four large mirrors to achieve a threefold concentration of sunlight on the module level. This will help accelerate module-aging tests and thus provide the photovoltaic industry with quicker and more precise forecasts about the presumed service lives of their modules. In conjunction with the increased laboratory testing possibilities provided by **Solab**, the quality assurance of photovoltaic modules will be substantially improved.



// Teststreifen mit CIGS-Rekordzelle aus der Durchlaufanlage des ZSW
// Test strip with CIGS record cell produced in the ZSW inline plant



// Solar-Tracker mit dreifacher Konzentration auf dem Solar-Testfeld Widderstall
// Solar tracker with threefold concentration at the Widderstall solar testing facility



// Weltweit erste Anlage zur Speicherung von Strom aus erneuerbaren Energien im Erdgasnetz

Durch Kombination von Wasser-Elektrolyse und Methanisierung konnte erstmalig ein Verfahren demonstriert werden, wie zukünftig große Strommengen aus erneuerbaren Energien im Erdgasnetz gespeichert werden können. Dabei reagiert CO_2 mit Wasserstoff zu Methan und Wasser. Während das Stromnetz nur eine begrenzte Speicherkapazität von 0,04 TWh aufweist, können im Erdgasnetz mit seinen Untertagespeichern über 200 TWh gespeichert werden.

// World's First Plant for Storing Electricity from Renewables in the Domestic Gas Grid

By combining water electrolysis and methanisation, ZSW was for the first time able to demonstrate a process that in future will enable large volumes of electricity generated from renewable energy to be stored in the domestic gas grid. In the process, CO_2 reacts with hydrogen to form methane and water. While the electricity grid provides only a limited storage capacity of 0.04 TWh, the domestic gas grid with its underground storage caverns can store more than 200 TWh.

// Erfolgreiches Monitoring der erneuerbaren Energien

Im Herbst 2009 wurde die erfolgreiche Arbeit des ZSW beim Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland bestätigt. Das Fachgebiet Systemanalyse erhielt vom Bundesumweltministerium den Auftrag, die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) wie schon seit 2004 für weitere sechs Jahre bis Ende 2015 zu leiten. Die AGEE-Stat erfasst systematisch den aktuellen Ausbaustand der erneuerbaren Energien in Deutschland. Die Leitung der Gruppe übernimmt Dr. Frank Musiol von Prof. Dr. Frithjof Staiß. Aktuelle Zahlen zum Stand der erneuerbaren Energien sind für Politik und Wirtschaft eine wichtige Entscheidungsgrundlage. So ist Deutschland nach einer EU-Richtlinie verpflichtet, bis zum Jahr 2020 mindestens 18% des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs – Strom, Wärme und Kraftstoffe – aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. 2009 waren es nach Ergebnissen der AGEE-Stat gut 10%.

// Successful Monitoring of Renewables

In the autumn of 2009, the successful work of ZSW in monitoring the development of renewables in Germany was acknowledged. The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety awarded the contract to the Systems Analysis department to lead the Working Group on Renewable Energy Statistics (AGEE-Stat) for another 6 years until the end of 2015, continuing the work it started in 2004. The AGEE-Stat systematically records the current status of development of renewable energy in Germany. Dr. Frank Musiol is taking over from Professor Dr. Frithjof Staiß as the head of the group. Up-to-date figures on the state of renewable energy sources provide an important basis for policy decisions for both politics and business. For instance, an EC directive obliges Germany to meet at least 18 % of its total energy consumption – for electricity, heat and fuels – from renewables by 2020. According to the findings of the AGEE-Stat, just over 10 % was achieved in 2009.



// Druckspeicher für Erdgasbetankung
// Pressure accumulator for refuelling with natural gas





The background of the entire page is a photograph of a wind farm. Several white wind turbines are visible against a clear blue sky. The foreground shows a green grassy field. A dark blue rectangular box is overlaid on the right side of the image, containing white text.

// Schwerpunktbericht 2009
Focus Report 2009
Speicherung erneuerbarer Energien
Renewable Energy Storage



// Schwerpunktbericht 2009 Focus Report 2009 Speicherung erneuerbarer Energien Renewable Energy Storage



// FOCUS

// Warum ist die Energiespeicherung eine Schlüsselkomponente in einem nachhaltigen Energiesystem?

Ziel eines zukünftigen Energiesystems ist eine nachhaltige Vollversorgung aus erneuerbaren Ressourcen. Viele erneuerbare Energien (EE) wie die Windkraft fallen jedoch fluktuierend an. Trotzdem sollen die Endenergien Strom, Wärme und Kraftstoff jederzeit ohne Nutzungsbeschränkungen zur Verfügung stehen. Das Kernproblem ist die Energiespeicherung. Auch zu Zeiten mit einem geringen Angebot an EE soll die Nachfrage gedeckt werden können.

// Why is energy storage a key component in a sustainable energy system?

The goal of future energy systems is a sustainable complete supply based on renewable resources. However, many renewable energy sources, such as wind power, provide energy in a fluctuating manner. Nevertheless, the final energy sources electricity, heat and fuel should be available at all times without usage restrictions. The core problem is energy storage. It should be possible to cover demand, even during periods when the supply of renewable energy sources is low.



// Quelle: RWE

Im heutigen Energiesystem wird die Vorhaltung von Energie durch die Lagerung fossiler Brennstoffe gelöst (Kohle, Erdöl und Erdgas). Die Bevorratung liegt hier typischerweise in einem Bereich, der dem Verbrauch von mehreren Monaten entspricht. Dies gilt jedoch nicht für Strom. Angebot und Nachfrage müssen sich stets genau die Waage halten. Bei einer überwiegenden Versorgung mit EE stellt sich die prinzipielle Frage, welche Speicher an die Stelle der Bevorratung fossiler Brennstoffe treten können.

Von den EE lässt sich Biomasse am einfachsten speichern, da diese als Brennstoff materiell vorliegt. Sie ist saisonal lagerfähig und steht bei Bedarf zur Wärme-, Strom- und Kraftstoffproduktion zur Verfügung. Biomasse eignet sich damit ideal für die Grundlastsicherung. Der Beitrag am (momentanen) Weltenergieverbrauch kann jedoch maximal ca. 20 % betragen. Ebenfalls grundlastfähig sind die Geothermie und Laufwasserkraft, die aber nur begrenzt zur Verfügung stehen. Die großen Potenziale der EE bilden die nicht limitierte Solarstrahlung sowie die Windenergie, die jedoch beide stark fluktuierend anfallen und nur begrenzt regelbar sind.

Ohne ausreichende Energiespeicherung wird eine gesicherte Vollversorgung mit EE nicht gelingen. Die Potenziale und die möglichen Einsatzbereiche der verschiedenen Speicher werden insbesondere durch die erforderliche Speicherkapazität und Speicherdauer sowie durch die Umwandlungsverluste und die Kosten bestimmt. Erst durch den Zusammenschluss verschiedener Stromerzeuger im Verbund mit Verbrauchern und neuen Speicherkonzepten sowie durch geschicktes Erzeugungs-, Last- und Speichermanagement entsteht ein Energiesystem, das die Vollversorgung mit EE jederzeit gewährleisten kann.

Die Thematik „Speicherung erneuerbarer Energie“ wird am ZSW interdisziplinär bearbeitet. Aktuelle FuE-Projekte und Schwerpunktthemen zur Stromspeicherung durch elektrochemische Systeme, zur Stromnetzintegration der Elektromobilität, zur bedarfsgerechten Nutzung und Einspeisung von Photovoltaikstrom und zur saisonalen Speicherung durch chemische Sekundärenergieträger wie beispielsweise Wasserstoff oder Erdgassubstitut befinden sich beim ZSW in der anwendungsnahen Entwicklung und werden im Folgenden vorgestellt.

In today's energy system, energy reserves are provided via the storage of fossil fuels (coal, crude oil and natural gas). The amount of energy thus stored is typically enough to cover several months' consumption. However, this does not apply to electricity. Supply and demand must always be precisely balanced. If supply is largely realised by means of renewable energy sources, the principal question is: Which storage systems can take the place of fossil fuel reserves?

Of all the renewable energy sources, biomass is the easiest to store, as this exists in material form as fuel. It can be stored seasonally and is available when needed for the production of heat, electricity and fuel. Biomass is thus ideal for base load coverage. However, it can only cover a maximum of around 20 % of the world's (current) energy consumption. Also suitable for covering the base load are geothermal energy and run-of-river hydroelectricity, which are also only available to a limited extent. The great potential of renewable energy sources resides in unlimited solar radiation and in wind energy, although both occur in a highly fluctuating manner and can only be partially controlled.

Without sufficient energy storage, a secure complete supply based on renewable energy sources will not be possible. The potential and the possible fields of application of the various storage systems depend, in particular, on the required storage capacity and storage duration, as well as the conversion losses and the costs. Only by bundling different electricity generators together with consumers and new storage concepts, along with clever management of generation, loads and storage, can an energy system be realised which can guarantee complete supply at all times, based on renewable energy sources.

At ZSW, the topic of storage of renewable energy is addressed in an interdisciplinary way. Current R&D projects and key topics regarding electricity storage by means of electrochemical systems, regarding the integration of electromobility into power grids, regarding demand-oriented usage and feeding of photovoltaic power and regarding seasonal storage by means of chemical secondary energy carriers such as hydrogen or substitute natural gas are being developed at ZSW in an application-oriented manner and shall be described in the following.



// Focus

// Was sind die Optionen zur Speicherung von erneuerbaren Energien?

Um Energie bedarfsgerecht bereitzustellen, steht eine ganze Reihe von verschiedenen Speicheroptionen zur Verfügung. Strom lässt sich nur bedingt direkt speichern (z.B. Kondensator). Stromspeichertechnologien nutzen deshalb potenzielle (Wasserkraft), mechanische (Druckluftspeicher), elektrochemische (Batterien) oder chemische Energie (Brennstoffe). Gängige Stromspeichertechnologien sind:

- > Pumpspeicherkraftwerke
- > Druckluftspeicher
- > Schwungradspeicher
- > Superkondensatoren
- > Elektrochemische Speicher
- > Chemische Energieträger

Das Einsatzgebiet von Pumpspeicherkraftwerken ist in der Regel die Stromspeicherung über mehrere Stunden bis hin zu Tagen. Solche Wasserkraftwerke dienen in der Energiewirtschaft seit Jahrzehnten als bevorzugtes Speichermedium, um Überschüsse zwischenzulagern und bei Bedarf (Spitzenlastabdeckung) wieder ins Stromnetz einzuspeisen. Da deren Ausbaupotenzial durch die geografischen Gegebenheiten und ökologischen Randbedingungen in Deutschland sehr stark eingeschränkt ist, werden sie nicht wesentlich zur zukünftigen Integration der EE ins Stromnetz beitragen können. Druckluftspeicher arbeiten in mit Pumpspeicherkraftwerken vergleichbaren Leistungsbereichen. Weltweit sind jedoch erst zwei Anlagen in Betrieb.

Die Speicherung in Schwungradspeichern oder Superkondensatoren ist insbesondere hinsichtlich Dauer und Kapazität begrenzt. Daher besteht deren primäre Aufgabe in der kurzfristigen (< 1 Stunde) Bereitstellung von Leistung zum Ausgleich von Schwankungen. Eine mittelfristige (< 1 Tag) Leistungsreserve stellen stationäre Batterien dar, deren Anwendung durch die stark eingeschränkte Energie- und Leistungsdichte sowie durch die Lebensdauer begrenzt wird.

What are the options for the storage of renewable energy?

A wide range of different storage options are available for demand-oriented provision of energy. Electricity can only be stored directly to a limited extent (e.g. capacitor). Electricity storage technologies therefore use potential (hydropower), mechanical (compressed air reservoirs), electrochemical (batteries) or chemical (fuels) energy. Common electricity storage technologies include the following:

- > Pumped hydro storage
- > Compressed air energy storage
- > Fly wheels
- > Supercapacitors
- > Electrochemical storage systems
- > Chemical energy carriers

Pumped hydro storage power plants are generally used for storing electricity for periods ranging from several hours to several days. In the energy industry, such hydroelectric power plants have for decades been the storage medium of choice for intermediate storage of excess capacities and for feeding these capacities back into the power grid when needed (peak load coverage). As their potential for expansion is very limited in Germany due to the geographical conditions and the ecological constraints, they will not be able to make a substantial contribution to the future integration of renewable energy sources into the power grid. Compressed air reservoirs operate with output ranges similar to those of pumped hydro storage power plants. However, there are as yet only two systems in operation worldwide.

Storage in fly wheel energy storage systems or supercapacitors is limited, particularly with regard to duration and capacity. Therefore, they are primarily used for short-term (< 1 hour) provision of power to compensate for fluctuations. Stationary batteries represent a medium-term (< 1 day) power reserve, although their use is limited by their low energy and power density and lifetime.

Die Verwendung stationärer Batteriespeicher kann aber im Zusammenhang mit der Steigerung des Selbstverbrauchs von Strom aus netzgekoppelten Photovoltaikanlagen von zunehmendem Interesse sein. Nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz wird seit 2009 die Selbstnutzung von photovoltaisch erzeugtem Strom gefördert. Für hohe Selbstnutzungsgrade ist eine Zwischenspeicherung der elektrischen Energie notwendig. Ein in einem Haus installierter Energiespeicher steht dann auch für weitere Funktionen wie eine Notstromversorgung zur Verfügung.

Die Integration mobiler Batterien zukünftiger Elektrofahrzeuge in das Stromnetz ermöglicht als sogenanntes „Vehicle-to-Grid“-Konzept sowohl das Laden der Batterien der Fahrzeuge (Energiespeicherung) als auch die gezielte Rückspeisung der Energie in das Stromnetz. Dadurch entsteht ein sehr großer „virtueller Batteriespeicher“. Die Nutzung wird jedoch durch die zeitliche Verfügbarkeit der Fahrzeuge und die vom Fahrzeughalter bereitgestellte Kapazität beschränkt und muss mit einem intelligenten und gesteuerten Lade-/Entladevorgang gekoppelt werden („Smart Grid“).

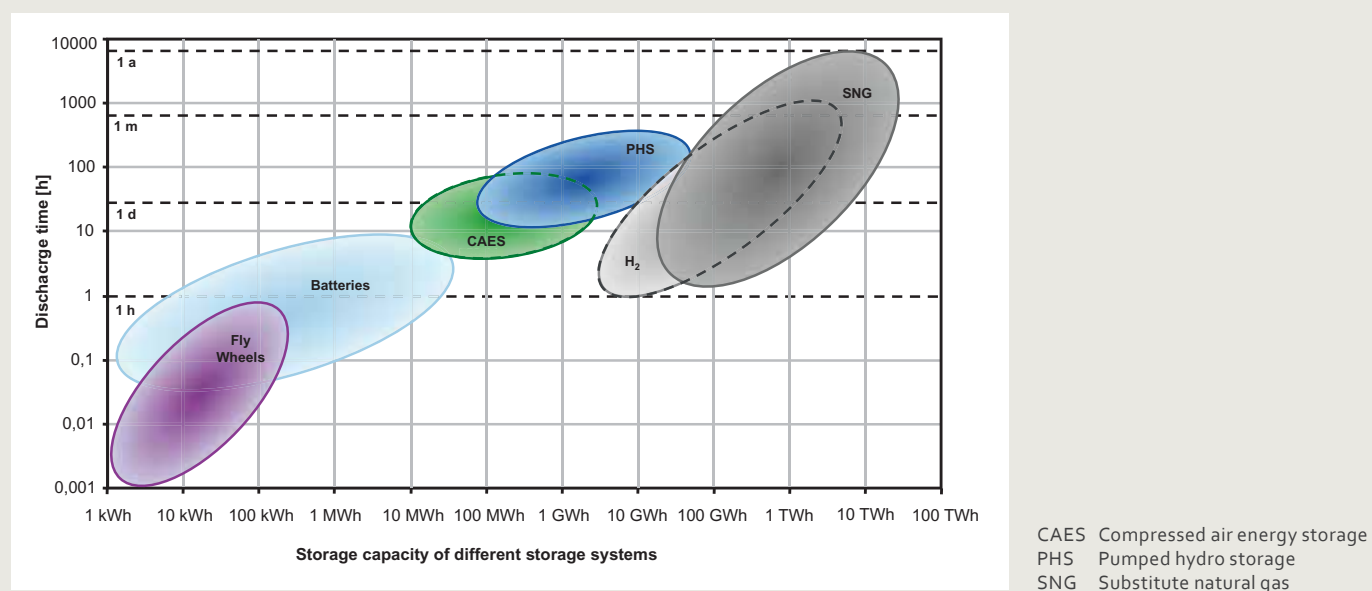
Als chemische Sekundärenergieträger kommen Wasserstoff und kohlenstoffbasierte Brennstoffe (z.B. Erdgassubstitut) in Betracht, die sich aus verschiedenen EE herstellen lassen. Die Ausspeicherleistungen bei der Untertage-Gasspeicherung inklusive der Verstromung reichen bis in den 10-GW-Bereich bei Zykluszeiten von Tagen bis Monaten. Sie stellen somit die einzige absehbare Option dar, EE mit einer Kapazität im Bereich von TWh saisonal zu speichern und bei Bedarf zurückzuverstromen (s. Abb. 1). Darüber hinaus können die definierten Sekundärenergieträger in anderen Anwendungsbereichen eingesetzt werden, etwa im Verkehr.

The use of stationary battery banks could be interesting in terms of producers using more of their own power produced from their own grid-connected photovoltaic systems. Since 2009, the producer's use of their own photovoltaically generated electricity has been promoted by the German Renewable Energy Sources Act (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG). Intermediate storage of the electrical energy produced is required if it is to be used to a large extent by the producer. Any energy storage system installed in a building would also be available for other functions, such as use as an emergency power supply.

The integration of future electric vehicles' mobile batteries into the power grid as part of a so-called "vehicle-to-grid" concept makes it possible to charge vehicles' batteries (energy storage) and systematically feed the energy back into the power grid. This creates a very large "virtual battery bank". However, usage is limited by the vehicles' availability times as well as by the capacity provided by the vehicle owners and must be coupled with an intelligent, controlled charge/discharge process ("smart grid").

Hydrogen and carbon-based fuels (e.g. substitute natural gas) that can be produced from various renewable energy sources are suitable as chemical secondary energy carriers. The withdrawal capacities of underground gas storage including conversion to electricity extend into the 10-GW range, with cycle times ranging from days to months. They therefore represent the only conceivable option for seasonally storing renewable energy with a capacity in the TWh range and converting it back into electricity when required (see fig. 1). In addition, the defined secondary energy carriers can be used in other application areas, such as in transport.

// Abb. 1: Entladungszeit und Speicherkapazität verschiedener Stromspeichersysteme
// Fig. 1: Renewable energy storage systems capacity and discharge time



// Welche Speicherkapazitäten stehen im Energiesystem zur Verfügung?

Die aufgeführten Zahlen in Tab. 1 verdeutlichen die Problematik bei der Stromspeicherung: Erzeugung und Verbrauch müssen zeitgleich erfolgen. Die heute vorhandene Stromspeicherkapazität beläuft sich auf nur 0,04 TWh, d.h. die Speicher könnten rein rechnerisch den kompletten Strombedarf Deutschlands für weniger als 1 Stunde decken.

Unter der Annahme, dass 40 Mio. Fahrzeuge alle gleichzeitig am Stromnetz angeschlossen sind und jedes Fahrzeug 10 kWh einspeist, beträgt die Speicherreichweite ca. 6 Stunden und übertrifft damit die bisher in Form von Pumpspeicherkraftwerken installierte Kapazität um ein Mehrfaches (Tab. 2). Durch die Einbindung von Traktionsbatterien kann die Elektromobilität damit wesentlich zur Stromspeicherung und Stromnetzstabilisierung beitragen.

Eine mehrtägige oder sogar saisonale Stromspeicherung ist jedoch im bestehenden System selbst unter der Annahme einer vollständigen Umstellung des Pkw-Bestands auf Elektrofahrzeuge nicht möglich. Nach heutigem Kenntnisstand ist für die saisonale Speicherung von Energie die Erzeugung von Sekundärenergieträgern eine notwendige Voraussetzung.

Flüssige und gasförmige Brennstoffe lassen sich im Gegensatz zu Strom direkt speichern. Im Kraftstoffmarkt werden Benzin und Diesel über Monate bevorratet. Die Gasspeicherkapazitäten in Deutschland sind um den Faktor 5000 höher als die Kapazitäten der Pumpspeicherkraftwerke (Tab. 1). Da sich Erdgas in modernen Kraftwerken mit einem Wirkungsgrad von nahezu 60 % verstromen lässt, liegt die Frage nahe, wie die Gasspeicherkapazität für die Speicherung von EE genutzt werden kann.

// Tab. 1: Energieverbrauch und -speicherkapazitäten in Deutschland (2008)
// Table 1: Energy consumption and storage capacity in Germany (2008)

		Electricity	Natural gas	Liquid fuels ¹⁾
Consumption	[TWh/a]	619	930	707
Average power	[GW]	70	106 ²⁾	81
Storage capacity	[TWh]	0,04 ³⁾	217 ⁴⁾	250 ⁵⁾
Calculated operating range of installed storage capacity ⁶⁾	[h]	0,6	2000	3100

1) Petrol, diesel, kerosene

2) Seasonally fluctuating

3) Pumped hydro storage

4) 46 underground gas storage facilities (LBEG, Hannover)

5) Provisioning of petrol, diesel, kerosene and heating oil

6) Related to average power

// What storage capacities are available in the energy system?

The figures in table 1 clarify the problematic aspects of electricity storage: Generation and consumption must occur simultaneously. The available electricity storage capacity adds up to just 0.04 TWh, i.e. the available storage facilities could theoretically cover Germany's entire electricity demand for less than 1 hour.

Assuming that 40 million vehicles are all simultaneously connected to the power grid and that each vehicle feeds in 10 kWh, the storage coverage amounts to around 6 hours and is thus many times higher than the capacity installed to date in the form of pumped hydro storage power plants (table 2). By incorporating traction batteries, electromobility can thus make a major contribution to electricity storage and power grid stabilisation.

However, even if all existing passenger cars were to be converted into electric vehicles, the existing system does not even enable electricity to be stored for several days, let alone seasonally. Current knowledge suggests that the production of secondary energy carriers is a necessary prerequisite for seasonal energy storage.

Liquid and gaseous fuels, unlike electricity, can be stored directly. In the fuel market, petrol and diesel are stored for months at a time. The gas storage capacities in Germany are around 5000 times higher than the capacities of pumped hydro storage power plants (table 1). As natural gas can be converted into electricity in modern power plants with an efficiency of almost 60 %, the obvious question is how the gas storage capacity can be used for the storage of renewable energy.

// Tab. 2: Energieverbrauch und -speicherkapazitäten durch Elektrofahrzeuge in Deutschland¹⁾
// Table 2: Energy consumption and storage capacity of electric vehicles in Germany¹⁾

		1 Million Electric Vehicles	40 Million Electric Vehicles
Consumption ²⁾	[TWh/a]	1,9	76
Percentage of electricity consumption	[%]	0,3	12
Storage capacity ³⁾	[TWh]	0,01	0,4
Calculated operating range of installed storage capacity ⁴⁾	[h]	0,15	6

1) Base year 2008

2) 0,16 kWh/km; 12 000 km/a

3) Storage capacity per vehicle: 10 kWh

4) Related to average power of 71 GW (compare table 1)



// Kurzzeitspeicherung: Welche Vorteile bietet die Elektromobilität für die Stromnetzstabilisierung?

Die Bundesregierung verfolgt mit dem 2009 verabschiedeten Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität das Ziel, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutsche Straßen zu bringen. Dies entspricht einem Anteil von ca. 2 % der 2009 in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. Tägliche Ladevorgänge bedingen eine erhöhte Netzlast, die in absehbarer Zeit und bei geeigneter Steuerung bisher nicht als netzkritisch angesehen wird.

Werden die Batterien der Fahrzeuge bidirektional in das Netz integriert und mit einem intelligenten Energiemanagement verknüpft, ist sowohl das Laden als auch das Entnehmen von Energie möglich (Vehicle-to-Grid). Batterien haben dabei den Vorteil einer sehr schnellen Ansprechzeit und können somit sehr flexibel zu- und abgeschaltet werden. Dadurch bieten diese mobilen Energiespeicher die Möglichkeit, Systemdienstleistungen zur Stabilisierung der Netze zu übernehmen, wie z.B. die Bereitstellung von Regelleistung oder den Lastausgleich. Tagsüber – bei hoher Netzlast – steht diese Energie durch Entladung zur Verfügung, während sie nachts in der Zeit niedriger Energienachfrage wieder aufgeladen werden. Dies führt zu einer Glättung der Lastkurve und entlastet die Stromerzeugung sowie – bedingt durch die räumliche Verteilung der Speicher – auch die Netze.

Die Bereitstellung von Netzdiensten durch das Vehicle-to-Grid-Konzept eröffnet Möglichkeiten für neue Geschäftsmodelle und bietet sowohl den Fahrzeugeigentümern als auch den Netzbe-

// Short-term storage: What benefits does electromobility offer for power grid stabilisation?

With its National Development Plan for Electromobility, passed in 2009, the German Federal Government is pursuing the goal of bringing a million electric vehicles onto German roads by 2020. This corresponds to around 2 % of the approved vehicles in Germany in 2009. Daily charging processes entail an increased grid load which in the foreseeable future, according to current opinion, will not be grid-critical if controlled properly.

If the vehicles' batteries are bidirectionally integrated into the grid and coupled with intelligent energy management, both the loading and the withdrawal of energy are possible (vehicle-to-grid). Here, batteries have the advantage of a very rapid response time and can thus be activated and deactivated very flexibly. Therefore, these mobile energy storage systems offer the possibility of taking over system services for grid stabilisation, e.g. the provision of balancing energy or load balancing. During the day, when the grid load is high, this energy is available by means of discharging; at night, when energy demand is low, they can be recharged. This smoothens the load curve and reduces the load on the power generation, as well as on the grid, depending on the spatial distribution of the storage systems.

The provision of grid services by means of the vehicle-to-grid concept opens up possibilities for new business models and offers financial advantages for vehicle owners and for grid opera-



// Zum größten Erdgasspeicher Westeuropas hat die WINGAS ihren Erdgasspeicher in Rehden ausgebaut. 4,2 Milliarden Kubikmeter Erdgas können hier gespeichert werden. Das ist rund ein Fünftel der in Deutschland verfügbaren Speicherkapazität.
 // WINGAS has expanded its natural gas storage facility in Rehden to make it the largest in Western Europe. 4.2 billion cubic metres of natural gas can be stored here. That is around a fifth of the available storage capacity in Germany.

// Quelle: WINGAS GmbH & Co. KG

treibern finanzielle Vorteile. Vehicle-to-Grid-Konzepte setzen ausreichende Möglichkeiten zum Netzanschluss voraus, einerseits für das Leitungsnetz, andererseits aber auch für den Informationsaustausch. Ferner werden die Batterien in den Fahrzeugen – heute die teuerste Komponente in einem Elektroauto – durch die Netz-Zusatzdienste zusätzlich belastet. Dementsprechend werden Batterien mit noch höheren Lebensdauern benötigt, und der Betriebsführung und Zustandsbestimmung der Batterien wird eine zentrale Bedeutung zukommen.

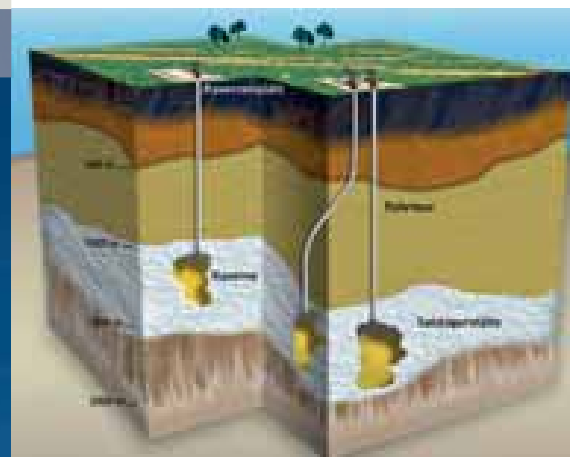
// Langzeitspeicherung: Welche Speicher bieten ausreichende Kapazität für die saisonale Energiespeicherung?

Eine prinzipielle Frage ist, welche Speicherleistung und welche Speicherkapazität des deutschen Stromnetzes bei 100-%-Vollversorgung durch EE erforderlich sind, um beispielsweise längere Windflauten zu überbrücken. Grundlastfähige EE zur Stromerzeugung mit einer prognostizierten Leistung von ca. 20 GW sind Bioenergie, Geothermie, Laufwasserkraftwerke und ca. 10 % der installierten Windkraftleistung. Bei einer durchschnittlichen Last von 70 GW verbleibt eine Speicherleistung in der Größenordnung von ca. 50 GW mit einer Speicherkapazität von nahezu 20 TWh, wenn die Leistung über einen Zeitraum von ca. 2 Wochen abgerufen wird. Zur Stromspeicherung stehen in Deutschland z.Zt. jedoch nur 0,04 TWh in Form von Pumpspeicherkraftwerken zur Verfügung. Bei einer Vollversorgung durch erneuerbaren Strom ist ein Ausbau der Speicherkapazitäten um das ca. 500-Fache notwendig!

tors. Vehicle-to-grid concepts require sufficient grid connection opportunities, not only for the power grid, but also for the exchange of information. Furthermore, the additional grid services mean that the vehicles' batteries, currently the most expensive components in electric cars, are subjected to additional strain. Accordingly, batteries with longer lifetimes are needed and the management and status-checking of batteries will be of key importance.

// Long-term storage: Which storage systems offer sufficient capacity for seasonal energy storage?

One key question in the event of 100-% supply based entirely on renewable energy sources is: How much storage output and storage capacity is required in the German power grid, e.g. in order to bridge longer wind lulls? For electricity generation, the renewable energy sources suitable for base load coverage, with a predicted capacity of around 20 GW, are: bioenergy, geothermal energy, run-of-river power plants and around 10 % of the installed wind power capacity. With an average load of 70 GW remains a storage output on the scale of around 50 GW with a storage capacity of almost 20 TWh, if the output is used over a period of about 2 weeks. However, for electricity storage in Germany, only 0.04 TWh are currently available in the form of pumped hydro storage power plants. For complete supply based on renewable electricity, storage capacities would have to be increased by a factor of around 500!



// Quelle: KGE – Kommunale Gasspeichergesellschaft Epe mbH & Co. KG

Für die erforderlichen Kapazitäten von ca. 20 TWh in Deutschland kommen nur chemische Energieträger infrage, die z.B. in Kavernen als Gas gespeichert werden können. Beim Vergleich eines Kavernenspeichers mit Wasserstoff als chemischem Speichermedium ergibt sich die ca. 10- bis 100-fache, bei regenerativ erzeugtem Erdgassubstitut sogar die ca. 30- bis 300-fache Speicherkapazität gegenüber der Druckluftvariante (abhängig vom Speicherdruck). Ein Vergleich mit den existierenden und den in Planung befindlichen Erdgasspeichern zeigt, dass diese Speicherkapazitäten heute in der bestehenden Infrastruktur bereits Realität sind (vgl. Tab. 1, Seite 20). Rein rechnerisch lassen sich 217 TWh von in Kavernen lagerndem Erdgas mit Gas- und Dampf-Kraftwerken in 130 TWh Strom konvertieren. Andere Speichertechnologien mit einer Kapazität in einer Größenordnung von > 10 TWh sind nicht in Sicht.

Bei der Speicherung von EE in Untertagespeichern bahnt sich jedoch ein Konflikt an: Die Technologien Druckluftspeicher und Gasspeicher (Erdgas, Erdgassubstitut oder Wasserstoff) können zumindest regional mit der sogenannten „Speicher“-Technologie CCS (Carbon Capture and Storage) konkurrieren, bei der es sich jedoch um eine Entsorgung von CO₂ handelt und nicht um eine Speicherung im eigentlichen Sinne. Sollte es bei der Verstromung fossiler Energieträger in erheblichem Umfang zu einer Deponierung von CO₂ in ausgeförderten unterirdischen Erdgaslagerstätten kommen, so stehen entsprechende Reservoirs zur saisonalen Speicherung von EE zumindest im Inland nicht mehr zur Verfügung.

In Germany, for the required capacities of around 20 TWh, the only viable option would be chemical energy carriers, which can be stored in caverns as gas, for example. In comparison, a reservoir cavern with hydrogen as the chemical storage medium has around 10 to 100 times the storage capacity of the compressed air variant; with renewably generated substitute natural gas, the storage capacity is even around 30 to 300 times as high (depending on the storage pressure). A comparison with existing and planned natural gas storage facilities shows that these storage capacities are already in place in the existing infrastructure (see table 1, page 20). From a purely theoretical point of view, 217 TWh of natural gas stored in caverns can be converted into 130 TWh of electricity with gas and steam power plants. Other storage technologies with a capacity on the scale of > 10 TWh are not on the horizon.

Nevertheless, a conflict is arising with regard to the storage of renewable energy in underground storage facilities: The technologies of compressed air reservoirs and gas storage facilities (natural gas, substitute natural gas or hydrogen) are competing with the so-called "storage" technology CCS (carbon capture and storage), which actually constitutes disposal of CO₂ and not storage as such. If the large-scale conversion of fossil fuels into electricity were to involve the dumping of CO₂ in depleted, natural gas underground storage facilities, at least inland the corresponding reservoirs would thus no longer be available for seasonally storing renewable energy.



// Quelle: MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG

// Aktuelle Forschungsprojekte des ZSW zur Energiespeicherung

Bei der Energiespeicherung liegt der Fokus des ZSW auf den Schwerpunktthemen „Elektrochemische Speicher“ und „Sekundärenergieträger“. Beide Themen sind eng mit dem Themenfeld Mobilität verknüpft, einerseits durch Batterien für die Elektromobilität und andererseits durch die Bereitstellung regenerativer Kraftstoffe (Wasserstoff, Erdgassubstitut) für konventionelle und hybridisierte Fahrzeugantriebe. Darüber hinaus werden systemanalytische Aspekte zur Speicherung EE interdisziplinär am ZSW bearbeitet und Fortbildungsangebote in Kooperation mit dem Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V. (WBZU) erstellt. Gemeinsames Ziel der Aktivitäten ist es, dass Stromnetz, Gasnetz und Verkehrssektor unter effizienter Nutzung EE zusammenwachsen. Die Schwerpunktthemen sind:

Fokus Elektrochemische Speicher

- > Vehicle-to-Grid
- > Photovoltaics/Battery-to-Grid
- > Batterie-Testzentrum

Fokus Sekundärenergieträger

- > Biomass-to-Gas
- > Power-to-Gas
- > Power-to-Liquid/Biomass-to-Liquid

Fokus Systemanalyse und Fortbildung

- > Systemanalytische Betrachtung verschiedener Optionen zur optimierten Integration erneuerbarer Energien in das deutsche Stromnetz
- > Technikfolgenabschätzung und Markteinführungsstrategien Elektromobilität
- > WBZU-Fachseminar „Energiespeicherung – Zukunftskonzepte im Zeitalter Erneuerbarer Energien“

// ZSW's current energy storage research projects

In energy storage, ZSW focuses on the key topics of electrochemical storage systems and secondary energy carriers. Both topics are closely related to the subject of mobility, firstly via batteries for electric traction and secondly via the provision of renewable fuels (hydrogen, substitute natural gas) for conventional and hybrid vehicle drives. In addition, systems-analysis-related aspects of renewable energy storage are addressed in an interdisciplinary way at ZSW and advanced training programmes are set up in cooperation with the Fuel Cell Education and Training Centre Ulm (Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., WBZU). The common goal of the activities is that the power grid, the gas network and the transport sector grow together with efficient use of renewable energy sources. The key topics are:

Focus on electrochemical storage systems

- > Vehicle-to-grid
- > Photovoltaics/Battery-to-grid
- > Battery test centre

Focus on secondary energy carriers

- > Biomass-to-gas
- > Power-to-gas
- > Power-to-liquid/Biomass-to-liquid

Focus on systems analysis and advanced training

- > Systems-analysis-based investigation of various options for optimised integration of renewable energy sources into the German power grid
- > Technological impact assessment and market introduction strategies for electromobility
- > WBZU specialist seminar "Energy storage – future concepts in the era of renewable energy"



// Quelle Brennstoffzellenfahrzeug: Daimler AG



// Vehicle-to-Grid

Eine ganz entscheidende Frage beim Vehicle-to-Grid-Konzept ist die Beeinflussung der Lebensdauer des Energiespeichers. Durch die Netz-Zusatzdienstleistungen kommt es zu einer zusätzlichen Belastung der Batterie, was prinzipiell zu einer kürzeren Lebensdauer des Speichers führt. Heutige Speicher haben aber quasi keine oder nur eine sehr geringe Reserve neben der eigentlichen Hauptaufgabe, dem Fahrzeugantrieb. Daher können die Netz-Zusatzdienste nicht ohne Weiteres von jedem Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden, sondern es ist ein vielfältiges und komplexes Energiemanagement notwendig, das die Lebensdauer des Speichers mitberücksichtigt. Heutige am ZSW entwickelte Ansätze zielen auf ein Energiehandelssystem. Als Basis dient ein Kostenmodell, welches die durch eine vorgegebene Dienstleistung verursachte Batteriealterung kalkulierbar macht. Ein derartiges Kostenmodell berücksichtigt neben der Belastung durch die Dienstleistung auch weitere Fakten wie eventuell vorhandene Reserven in der Batterielebensdauer oder spezielle Anforderungen des Fahrers.

Weitere wichtige Fragestellungen wie die Beeinflussung des elektrischen Netzes, der Einfluss von neuen Konzepten wie Schnellladung und induktive Nachladung, die generelle Veränderung der Mobilität sowohl gesellschaftlich als auch technologisch sowie Fragen zur Marktentwicklung werden in Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen und Industriepartnern bearbeitet.

// Photovoltaics/Battery-to-Grid

Das deutsch-französische Forschungs- und Entwicklungsprojekt Sol-ion entwickelt und erprobt in Haushalten installierte netzgekoppelte Photovoltaik (PV)-Systeme in Verbindung mit Lithium-Ionen-basierten Speichern zur Verbesserung der Integration von Solarstrom in das öffentliche Stromnetz. Das Gesamtsystem besteht aus einem Wechselrichter, einem Batterieladegerät und einer Lithium-Ionen-Batterie sowie dem System- und Energiemanage-

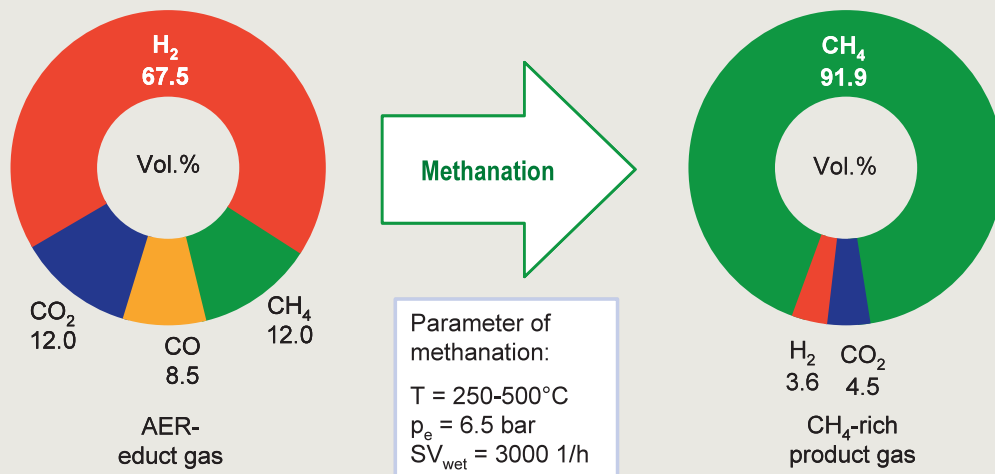
// Vehicle-to-grid

One very decisive aspect in the vehicle-to-grid concept is the influence on the lifetime of the energy storage system. The additional grid services entail additional strain on the battery, which in principle leads to a shorter lifetime for the storage system. However, today's storage systems have virtually no energy in reserve, or very little, besides that required for the actual main task, which is to power the vehicle. Therefore, the additional grid services cannot be provided by every vehicle; instead, multifaceted and complex energy management, which takes the storage system's lifetime into account, is needed. Current approaches developed at ZSW are geared toward an energy trading system based on a cost model which enables calculation of the battery aging caused by a specified service. This type of cost model takes into account not only the strain caused by the service, but also other factors, such as any reserve battery lifetime or the driver's special requirements.

Other important issues, such as the influence on the power grid, the influence of new concepts such as quick charging and inductive recharging, the general change in mobility both societally and technologically as well as market development issues, are addressed in cooperation with other research institutes and industrial partners.

// Photovoltaics/Battery-to-grid

The Franco-German research and development project Sol-ion develops and tests grid-connected photovoltaic (PV) systems installed in households, in conjunction with lithium-ion-based storage systems for improved integration of solar power into the public power grid. The overall system consists of an inverter, a battery charger and a lithium-ion battery, as well as system and energy management (EMS). The storage capacity is 10 to 12 kWh



// Abb. 3: Zusammensetzung des Gases aus dem AER-Prozess vor und nach Methanisierung
 // Fig. 3: Gas composition out of AER process before and after methanation

der eingesetzten Materialien können insbesondere Lithium-Ionen-Batterien unter außergewöhnlichen Betriebszuständen brennen oder sogar explodieren. Die Untersuchung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien ist daher eine zentrale Aufgabe des Batterie-Testzentrums am ZSW. Weitere Aufgaben bestehen in der messtechnischen Parametrierung neuartiger Batterien sowie in der Durchführung von Lebensdaueruntersuchungen. Letztere sind sehr aufwändig, da die erzielbare Lebensdauer von zahlreichen Parametern abhängt und die Durchführung sehr zeit- und kostenintensiv ist. Soll z.B. das Lebensdauerverhalten einer Zelle vollständig bestimmt werden, so müssen etwa 10 bis 50 Zellen für eine Dauer von 3 bis 24 Monaten kontinuierlich unter verschiedenen Bedingungen zyklisiert werden. Diese Messergebnisse dienen nicht nur zur Überprüfung der Eignung eines Zelltyps, sondern auch zur Optimierung der Betriebsstrategie in Fahrzeugen oder stationären Systemen.

// Biomass-to-Gas

Für die energetische Nutzung von Biomasse zur Herstellung von gasförmigen Energieträgern eignen sich je nach biogenem Einsatzstoff fermentative oder thermochemische Konversionsprozesse. Während bei der Fermentation ein Biogas mit den Hauptbestandteilen Methan und Kohlendioxid gewonnen wird, enthält ein Rohgas aus der Biomassevergasung vor allem Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Die erzeugten Brenngase können direkt für die Strom- und Wärmeerzeugung genutzt oder zu gasförmigen Energieträgern wie Erdgassubstitut (SNG, Substitute Natural Gas), Wasserstoff oder Synthesegas konvertiert bzw. aufbereitet werden. Folgende Lösungsansätze werden schwerpunktmäßig untersucht:

- > Biomassevergasung nach dem AER-Verfahren
- > SNG-Herstellung aus Vergasungsgas, insbesondere aus AER-Produktgas
- > H₂-Abtrennung aus Vergasungsgas, insbesondere aus AER-Produktgas

Besonderes Merkmal der AER-Vergasung ist die vergaserintegrierte Abtrennung von CO₂. Das Produktgas weist dadurch einen deutlich größeren Wasserstoffanteil auf. Aufgrund dieser Gasstöchiometrie kann das AER-Produktgas mittels eines Syntheseschrittes (Methanisierung) in einspeisefähiges SNG konvertiert

operating conditions) burn or even explode. Therefore, testing the safety of lithium-ion batteries is a key task of the battery test centre at ZSW. Other tasks involve configuring new types of batteries by means of technical measurements, as well as conducting lifetime determination tests. The latter are very laborious, as the achievable lifetime depends on many parameters and conducting the tests is very time-intensive and cost-intensive. If, for example, the lifetime behaviour of a cell is to be determined completely, around 10 to 50 cells must be cycled continually for 3 to 24 months under various conditions. These measurement results serve not only to test the suitability of a cell type, but also for optimisation of the operating strategy in vehicles or stationary systems.

// Biomass-to-gas

For the production of gaseous fuels via the use of biomass for energy, fermentative or thermochemical conversion processes can be used, depending on the biogenic feedstock. With fermentation, the main components of the biogas produced are methane and carbon dioxide, whereas raw gas from biomass gasification primarily contains hydrogen and carbon monoxide. The fuel gases produced can be used directly for generation of electricity and heat, or can be converted or treated to produce gaseous energy sources, such as substitute natural gas (SNG), hydrogen or synthesis gas.

At ZSW, investigations focus on the following possible solutions:

- > Biomass gasification using the AER (absorption-enhanced reforming) process
- > SNG production from gasification gas, particularly from AER product gas
- > H₂ separation from gasification gas, particularly from AER product gas

One special characteristic of AER gasification is that CO₂ separation is integrated into the gasification unit. Therefore, the product gas contains a significantly higher proportion of hydrogen. Due to this gas stoichiometry, the AER product gas can be converted into

// Focus

werden. Bei optimaler Prozessführung entfallen weitere Gas-trennverfahren, was die Gesamtprozesskette stark vereinfacht und die Effizienz deutlich verbessert. Ein typisches Beispiel für die Gaszusammensetzung nach dem AER-Vergasungs- sowie dem nachfolgenden Methanisierungsschritt zeigt Abb. 3.

Das so erzeugte SNG kann problemlos in das weit verzweigte Erdgasverteilnetz eingespeist werden. Somit können regionale Biomasseaufkommen vom Ort der energetischen Nutzung entkoppelt werden, wobei das Erdgasnetz als Speicher- und Verteilungsmedium dient. Die Nutzungsmöglichkeiten von SNG sind vielseitig: Neben der Gewinnung von Strom und Wärme in zentralen bzw. dezentralen Kraftwerken kann SNG auch als Kraftstoff im mobilen Sektor für Erdgasfahrzeuge oder für die dezentrale Wasserstoffherzeugung an Tankstellen eingesetzt werden.

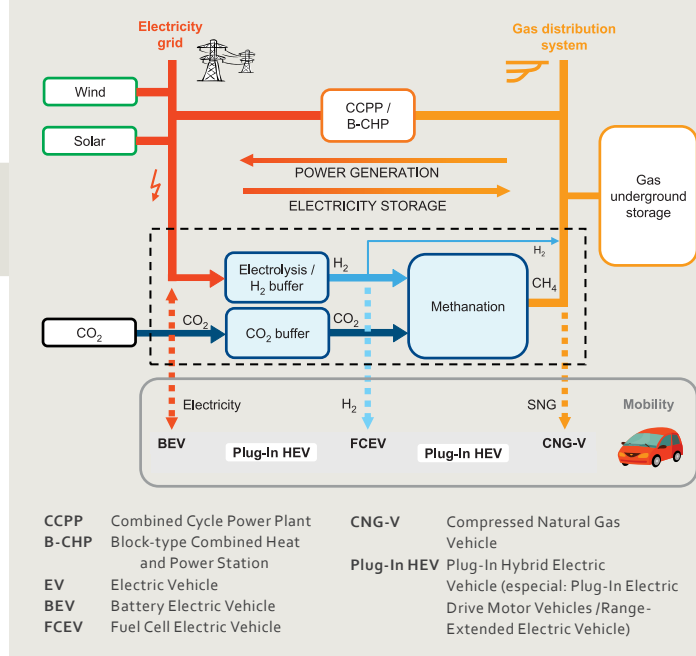
Aufgrund seines hohen Wasserstoffgehaltes bietet das AER-Produktgas ideale Voraussetzungen für die Herstellung von Reinstwasserstoff. Dabei wird das Rohgas nach der Abreinigung verschiedener Minorkomponenten einer Druckwechseladsorptionseinheit (PSA: Pressure Swing Adsorption) zugeführt, welche den im Vergasungsgas enthaltenen Wasserstoff von weiteren Gasbestandteilen separiert. Der biogene Wasserstoff bietet sich insbesondere zur Versorgung von Wasserstoff-Tankstellen an.

Die Umwandlung von Biomasse in gasförmige Energieträger wird in Zukunft einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung leisten. Daher wurde vom ZSW im Jahr 2009 die FuE-Plattform BtG (Biomass-to-Gas) initiiert. Hier werden FuE-Aktivitäten von Forschungseinrichtungen und Industrie zu den Themenkomplexen Biomassebereitstellung und -konversion sowie Produktgasnutzung gebündelt. Die BtG-Plattform ist eng verknüpft mit der AER-Vergasungsanlage der Betreibergesellschaft TBM (Technologieplattform Bioenergie und Methan) in Geislingen-Türkheim (Baden-Württemberg), die voraussichtlich 2011 in Betrieb gehen wird.

// Power-to-Gas

Bei der Entwicklung des Power-to-Gas-Konzeptes hat sich das ZSW von zwei Kernfragen leiten lassen: Welche Speicher bieten eine ausreichende Kapazität für einen saisonalen Ausgleich? Und welche Speicher lassen sich am einfachsten in die bestehende Infrastruktur integrieren?

Das Grundprinzip des Power-to-Gas-Konzeptes ist die bidirektionale Verknüpfung der existierenden Infrastruktureinheiten Stromnetz und Gasnetz mit dem Ziel, ein neuartiges Last- und Erzeugungsmanagement zu etablieren, das die Aufnahme hoher Anteile fluktuierender Stromerzeugung aus EE ins Energiesystem ermöglicht. Bislang besteht die Verknüpfung nur durch Stromerzeugung aus Erdgas (Gas-to-Power), nicht jedoch in umgekehrter Richtung (Power-to-Gas). Grundlage des neuen Konzeptes ist, aus Gründen



// Abb. 4: Wind-to-SNG-Konzept zur bidirektionalen Kopplung von Strom- und Gasnetz mit Anbindung an den Verbrauchssektor Mobilität
// Fig. 4: Wind-to-SNG concept for bidirectional coupling of the electricity and gas grid and interconnection to consumer sector mobility

feed-in SNG by means of a synthesis step (methanation). With optimal process management, other gas separation processes can be avoided, which greatly simplifies the overall process chain and significantly improves efficiency. A typical example of the gas composition after AER gasification and the subsequent methanation step can be seen in fig. 3.

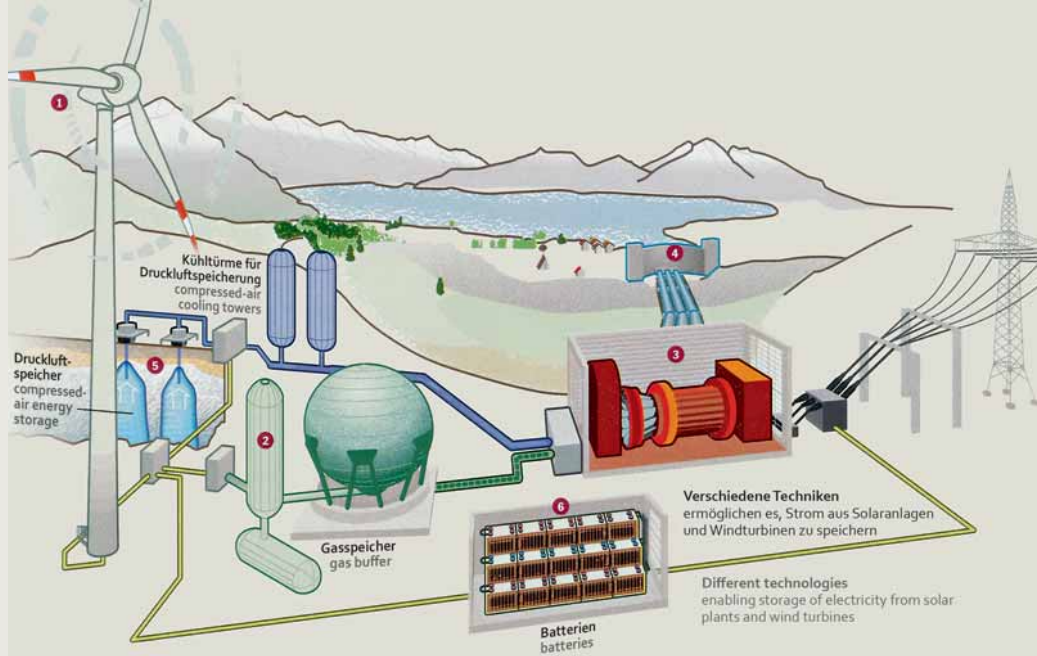
The SNG thus produced can be fed into the large and complex natural gas distribution network without any problems. This allows regional occurrence of biomass to be decoupled from the location of the energy usage, whereupon the natural gas network serves as the storage and distribution medium. The possible uses of SNG are diverse: Alongside the generation of electricity and heat in centralised or decentralised power plants, SNG can also be used as a fuel in the mobile sector for natural gas vehicles or for decentralised hydrogen production at filling stations.

Due to its high hydrogen content, AER product gas is ideal for the production of ultrapure hydrogen. Here, after being cleansed of various minor components, the raw gas is put through a pressure swing adsorption (PSA) unit, which separates the hydrogen in the gasification gas from other gas components. Biogenic hydrogen is particularly suitable for supplying hydrogen filling stations.

The conversion of biomass into gaseous energy sources will make a key contribution to a sustainable energy supply in the future. For this reason, ZSW initiated the R&D platform BtG (biomass-to-gas) in 2009. Here, R&D activities of research institutes and industrial players are bundled under the subject headings of "biomass provision and conversion" and "use of product gas". The BtG platform is closely linked to the AER gasification plant owned by the operating company TBM (Technology Platform Bioenergy and Methane) in Geislingen-Türkheim (Federal State of Baden-Württemberg), Germany, which is expected to be commissioned in 2011.

// Power-to-gas

In the development of the power-to-gas concept, ZSW has oriented itself toward two core questions: Which storage systems provide sufficient capacity for seasonal balancing? And which storage



// Regenerativen Strom besser speichern

- 1 Windkraft- oder Solaranlagen liefern mal zu viel, mal gar keinen Strom.
- 2 Mit dem Ökostrom wird Wasserstoff oder Methan hergestellt. Beide Gase sind lagerfähig.
- 3 Bei Strombedarf im Netz nutzt eine Turbine den Gasvorrat.
- 4 Pumpspeicher-Kraftwerke sind die meistgenutzten Strompuffer.
- 5 Auch unter hohem Druck in den Untergrund gepresste Luft ist ein Energiespeicher.
- 6 Batterien stabilisieren das Netz.

// Improved storage of renewable energy

- 1 Wind turbines and solar power systems sometimes supply too much electricity, and sometimes no electricity at all.
- 2 With eco-electricity, hydrogen or methane are produced. Both gases can be stored.
- 3 If electricity is required by the grid, a turbine utilises the gas reserves.
- 4 Pumped hydro storage power plants are the most used electricity buffers.
- 5 Compressed air, which is kept under pressure underground, can also be used as an energy storage medium.
- 6 Batteries stabilise the grid.

// Quelle: Focus 11/2010

der Netzstabilität nicht einspeisbare bzw. preiswert verfügbare Elektrizität (z.B. bei hohem Windstromaufkommen) in Form von Erdgassubstitut zu speichern. Ein wesentliches Ziel ist es, die Energielieferung von Windparks plan- und regelbar zu gestalten. Das Prinzip ist in Abb. 4 dargestellt.

Das Konzept sieht vor, „überschüssigen“ Strom aus fluktuierenden Quellen mittels Elektrolyse zunächst zu Wasserstoff und in einer anschließenden Synthesestufe (Methanisierung) mit CO_2 zu einem Erdgassubstitut umzusetzen. Wegen der stark schwankenden Erzeugung in Verbindung mit Prognoseungenauigkeiten ist primär die Verbindung mit Windenergieanlagen vorgesehen (interne Bezeichnung: „Wind-to-SNG“). Potenziell kann aber auch Solarstrom eingesetzt werden bzw. jede andere erneuerbare Stromquelle.

Mit einer Power-to-Gas-Anlage kann durch gezieltes Drosseln oder Abschalten der Elektrolyse in Zeiten schwächeren Windstromangebots bzw. höherer Stromnachfrage die Gesamtlast gesenkt werden. Um zu jeder Zeit – auch bei Windflaute – eine konstante Last zur Verfügung stellen zu können, ist eine Kombination der Power-to-Gas-Anlage mit GuD- oder Blockheizkraftwerken ein sinnvolles Konzept, wobei die Verstromung nicht notwendigerweise am Standort der Power-to-Gas-Anlage erfolgen muss.

Das Power-to-Gas-Konzept passt hervorragend in das bestehende Energiesystem, insbesondere vor dem Hintergrund des zukünftig stark steigenden Anteils EE im Stromnetz. Ein besonderer Vorteil des Konzepts gegenüber anderen Optionen, die die bessere Integration fluktuierender Stromquellen über Speichermedien gewährleisten, ist die Nutzung des Erdgasnetzes mit seiner quasi unbegrenzten Speicherkapazität. Hervorzuheben ist zudem die besondere Flexibilität hinsichtlich der Weiterverwendung der gespeicherten Energie, denn SNG kann nicht nur rückverstromt, sondern auch im Wärme- oder Kraftstoffmarkt eingesetzt werden. Letzteres ist vor dem Hintergrund des geplanten steigenden Anteils von regenerativen Kraftstoffen von besonderem Interesse.

systems can be integrated into the existing infrastructure most easily?

The basic principle of the power-to-gas concept is the bidirectional linking of the existing infrastructure units (the power grid and the gas network) with the goal of establishing a new way of managing loads and generation, which enables high proportions of fluctuating electricity generation from renewable energy sources to be accommodated in the energy system. To date, this link only exists in terms of electricity generation from natural gas (gas-to-power), but not in the other direction (power-to-gas). The new concept is based on storing electricity which cannot be fed into the grid for reasons of grid stability, or cheaply available electricity (e.g. at times when a large amount of wind power is available), in the form of substitute natural gas. One key goal is to enable the planning and control of the energy supply from wind farms. The principle is shown in fig. 4.

The concept envisages firstly using electrolysis to convert “excess” electricity from fluctuating sources into hydrogen, then into substitute natural gas (SNG) in a subsequent synthesis step (methanation) with CO_2 . Due to the highly fluctuating generation, in combination with the imprecision of forecasts, it is primarily envisaged for use in combination with wind turbines (internally referred to as “wind-to-SNG”). However, solar power could potentially also be used, or any other source of renewable electricity.

During periods when less wind power is available, or when there is greater electricity demand, the overall load can be reduced by systematically reducing or deactivating the electrolysis with a power-to-gas system. In order to be able to provide a constant load at all times, even during wind lulls, a combination of a power-to-gas system with gas and steam or combined heat and power plants is a concept which makes sense; here, the conversion to electricity does not necessarily have to take place on the site of the power-to-gas system.

The power-to-gas concept suits the existing energy system extremely well, particularly with regard to the fact that the proportion of renewable energy sources in the power grid is set to increase

// Focus

// Tab. 3: Reaktionsbedingungen für die Brennstoffherzeugung aus Synthesegas
// Table 3: Reaction conditions for fuel synthesis via synthesis gas

	Product	Pressure	Temperature	Catalyst	H ₂ :CO ¹⁾
Methanol	CH ₃ OH	50–100 bar	250–280 °C	Cu/ZnO	2:1
Fischer-Tropsch (Low Temp.)	–CH ₂ –, long (Waxes)	10–30 bar	190–240 °C	Co Fe	2:1
Fischer-Tropsch (High Temp.)	–CH ₂ –, short (Olefines)	3–40 bar	250–350 °C	Fe	2:1
Methane	CH ₄	< 10 bar	250–550 °C	Ni	3:1
Direct DME	CH ₃ -O-CH ₃	50 bar	260 °C	special	1:1

1) Optimal synthesis gas ratio H₂/CO used in technical application can differ from stoichiometric value depending on reactor type, process conditions, and catalyst

// Power-to-Liquid/Biomass-to-Liquid

Nach dem gleichen Grundprinzip wie bei den Biomass-to-Gas- und Power-to-Gas-Konzepten können anstelle von Gasen auch flüssige, leicht speicherbare Brennstoffe wie Kohlenwasserstoffe (z.B. Benzin oder Diesel), Alkohole (z.B. Methanol) oder Ether (z.B. Dimethylether, DME) synthetisiert werden. Die Herstellung ist sowohl aus H₂ und CO₂ (Power-to-Liquid) als auch aus biomassestämmigen Synthesegasen (H₂/CO/CO₂) (Biomass-to-Liquid) möglich (siehe Tab. 3).

// Systemanalytische Betrachtung verschiedener Optionen zur optimierten Integration erneuerbarer Energien in das deutsche Stromnetz

In der aktuellen öffentlichen Diskussion und nicht zuletzt aufgrund des im August 2009 veröffentlichten Nationalen Entwicklungsplans Elektromobilität der Bundesregierung gewinnt das Thema Elektromobilität zunehmend an Bedeutung. Neben der Möglichkeit neuer Konzepte einer postfossilen Mobilität setzt man dabei auch hohe Erwartungen in Elektrofahrzeuge als mobile Speicher zur Netzintegration EE. Darüber hinaus gibt es weitere Speicheroptionen, z.B. das am ZSW entwickelte Wind-to-SNG-Konzept, die neben Netzausbau, „Smart Grids“ und Last-Management diskutiert werden. Ein Vergleich verschiedener Integrationsoptionen, der Vor- und Nachteile unter verschiedenen Blickwinkeln analysiert und Empfehlungen auf Grundlage des aktuellen Kenntnisstands formuliert, wird im ZSW-Fachgebiet Systemanalyse als Gemeinschaftsprojekt mit drei weiteren Fachgebieten des ZSW durchgeführt.

// Technikfolgenabschätzung und Markteinführungsstrategien Elektromobilität

Im Fachgebiet Systemanalyse werden Technologien nie isoliert, sondern insbesondere auch im Zusammenhang mit Aspekten der Technikfolgenabschätzung betrachtet. Im Bereich der Elektromobilität sind dies beispielsweise Fragen zum notwendigen Umbau der Energieversorgungsstruktur, zum resultierenden Strom-

significantly in the future. One particular advantage of this concept over other options which guarantee better integration of fluctuating electricity sources via storage media is the use of the natural gas network, with its virtually unlimited storage capacity. Also worthy of note is the particular degree of flexibility regarding subsequent use of the stored energy, because not only can SNG be converted back into electricity, it can also be used in the heating market or the fuel market. The latter is of particular interest in the context of the planned increase in the proportion of renewable fuels.

// Power-to-liquid/Biomass-to-liquid

On the same basic principle as that of the biomass-to-gas and power-to-gas concepts, instead of synthesising gases, it is also possible to synthesise liquid fuels which can be stored easily, such as hydrocarbons (e.g. petrol or diesel), alcohols (e.g. methanol) or ethers (e.g. dimethyl ether, DME). These can be produced from H₂ and CO₂ (power-to-liquid), as well as from biomass-based synthesis gases (H₂/CO/CO₂) (biomass-to-liquid) (see table 3).

// Systems-analysis-based investigation of various options for optimised integration of renewable energy sources into the German power grid

In the current public debate and, to no small extent, due to the German Federal Government's National Development Plan for Electromobility published in August 2009, the topic of electromobility is becoming increasingly important. In this regard, alongside the possibility of new concepts for post-fossil mobility, great expectations are being attached to electric vehicles as mobile storage systems for integration of renewable energy sources into the grid. In addition, other storage options (e.g. the wind-to-SNG concept developed at ZSW) are being discussed alongside grid expansion, smart grids and load management. A comparison of different integration options, in order to analyse the pros and cons from different perspectives and to formulate recommendations based on current knowledge, is to be conducted in the Systems Analysis department as a joint project with three other ZSW departments.



// Quelle: Andreas Brinner/ DLR

bedarf oder zur direkten Verknüpfung mit EE. Bezüglich der Batterietechnologien werden zudem Fragen zur Verfügbarkeit von Rohstoffen und zu Kostenstrukturen behandelt. Darüber hinaus wird die Beurteilung der Marktchancen von Elektromobilen verknüpft mit der Frage, was für den Markteintritt notwendig ist und wie geeignete Markteinführungsinstrumente aussehen können.

// WBZU-Seminar „Energiespeicherung – Zukunftskonzepte im Zeitalter Erneuerbarer Energien“

Das Thema Energiespeicherung und Integration von EE wird auch in das Fortbildungsprogramm des Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V. (WBZU) aufgenommen, mit dem das ZSW eng kooperiert. Dazu wurde durch Mitarbeit der ZSW-Fachgebiete Systemanalyse und Akkumulatoren ein Fachseminar konzipiert. Der ganzheitliche Ansatz vermittelt ausgehend von der zukünftigen Entwicklung EE und der damit verbundenen Speicherproblematik einen Überblick über bestehende und zukünftige Speichertechnologien in Verbindung mit dem Stromnetz der Zukunft.

Der Schwerpunkt des Seminars liegt auf der Vermittlung der wesentlichen Aspekte, durch die eine nachhaltige Energiewirtschaft gesichert werden kann. Kurz- und Mittelfristspeicher wie Schwungräder und Batterien sowie Optionen zur langfristigen Energiespeicherung wie Wasserstoff oder auch erneuerbar erzeugtes Methan (Wind-to-SNG) stellen dabei nur einen Baustein dar. Die Netze der Zukunft bestimmen aktuell auch Schlagworte wie „Lastmanagement-Konzepte“ und „Smart Grids“, „vernetzte Elektromobilität“ sowie auch „Virtuelle Kraftwerke“ und „Kombikraftwerke“; werden innerhalb des Seminars näher analysiert und eingeordnet.

// Coordinator
Dr. Michael Specht

// Technological impact assessment and market introduction strategies for electromobility

In the Systems Analysis department, technologies are never considered in isolation but particularly in terms of assessing their technological impact. In the electromobility field, for example, this relates to issues concerning the necessary redevelopment of the energy supply structure, the resulting electricity requirement or the direct integration of renewable energies. In terms of battery technologies, the raw material availability and cost structures are also examined. In addition, the assessment of market opportunities for electric vehicles is also concerned with determining what is needed for a market introduction and which would be suitable market introduction instruments.

// WBZU seminar “Energy storage – future concepts in the era of renewable energy”

The topic of energy storage and integration of renewable energy sources is also included in the advanced training programme of the Fuel Cell Education and Training Centre Ulm (Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., WBZU), with which ZSW cooperates closely. In addition, a specialist seminar was devised on the basis of cooperation between the ZSW departments Systems Analysis and Accumulators. Based on the future development of renewable energy sources and the associated storage problems, the holistic approach provides an overview of existing and future storage technologies in connection with the power grid of the future.

The seminar focuses on conveying essential aspects with which a sustainable energy industry can be secured. Short-term and medium-term storage systems such as flywheels and batteries, as well as options for long-term energy storage such as hydrogen or renewably generated methane (wind-to-SNG) constitute just one component. Currently, networks of the future also entail catch phrases such as “load management concepts”, “smart grids”, “networked electromobility”, “virtual power plants” and “combined power plants” – these are analysed and classified in more detail during the seminar.



// Fachgebiete und Projekte
Departments and Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Wo stehen wir beim Ausbau erneuerbarer Energien? Wie wirken die Instrumente, die sie fördern sollen? Was fehlt auf dem Weg in eine nachhaltige Energieversorgung, und was sollte die Politik tun? Das sind die Fragen, die das Fachgebiet Systemanalyse beschäftigen. Das interdisziplinäre Fachgebiet aus Natur- und Wirtschaftswissenschaftlern sowie Ingenieuren hat sich auf Fachthemen jenseits der reinen Technikentwicklung spezialisiert.

Mit Machbarkeitsstudien, ökonomischen Analysen und der Entwicklung und Evaluierung von Förderinstrumenten werden im Rahmen der Politikberatung Wege aufgezeigt, wie erneuerbaren Energien der Markt bereitet und unser Energieversorgungssystem nachhaltig umgestaltet werden kann. Hinzu kommen langjährige Erfahrungen in der Datenaufbereitung und Entwicklung fundierter Statistiken über den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland.

Eine Forschergruppe, die sich auf nichtlineare Modellierungen und unter anderem deren Anwendung bei der Integration erneuerbarer Energien ins Stromnetz spezialisiert hat, rundet die Kompetenzen des Fachgebiets ab.

// Our Main Focus

How do renewable energies develop? How do promotion activities for renewables work? What do we need to do to achieve a sustainable energy system and how can policy support it? These are the main questions the Systems Analysis department is working on. The interdisciplinary team consisting of scientists, economists and engineers has focused on topics beyond pure technological development.

With feasibility studies, economic analyses and the development and evaluation of promotion activities we show how to support renewable energies and how to switch our energy system to a sustainable one. Furthermore, we have long-term experience in data preparation and creation of well-founded statistics about the development of renewable energies in Germany.

A group of scientists focusing on non-linear modeling, which can be used for improving the grid integration of renewables, complements the expertise of the department.



// Contact

Dr. Frank Musiol

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

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

// Energiekonzept Baden-Württemberg 2020

Energy Concept 2020

// Monitoring zum „Energiekonzept Baden-Württemberg 2020“

Mit der Zielsetzung, für das Land Baden-Württemberg einen Weg für eine sichere, wirtschaftliche und umweltfreundliche Energieversorgung aufzuzeigen, hatte die Landesregierung bereits 2007 begonnen, ein „Energiekonzept Baden-Württemberg 2020“ zu erarbeiten. Die Systemanalytiker des ZSW haben dabei Baden-Württembergs Wirtschaftsministerium intensiv beraten und in einem umfangreichen Anhörungs- und Abstimmungsprozess unter anderem mit der Erstellung des Kurzgutachtens „Ausbau erneuerbarer Energien und der Kraft-Wärme-Kopplung bis zum Jahr 2020“ inhaltlich unterstützt. Für das inzwischen verabschiedete Energiekonzept wurde das ZSW mit einem Monitoring beauftragt. Mit einem jährlichen Bericht wird die Entwicklung des Einsatzes erneuerbarer Energien im Strom- und Wärmesektor sowie die Entwicklung der Energieeffizienz mit der Schwerpunktsetzung im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung dokumentiert und mit den Zielsetzungen verglichen.

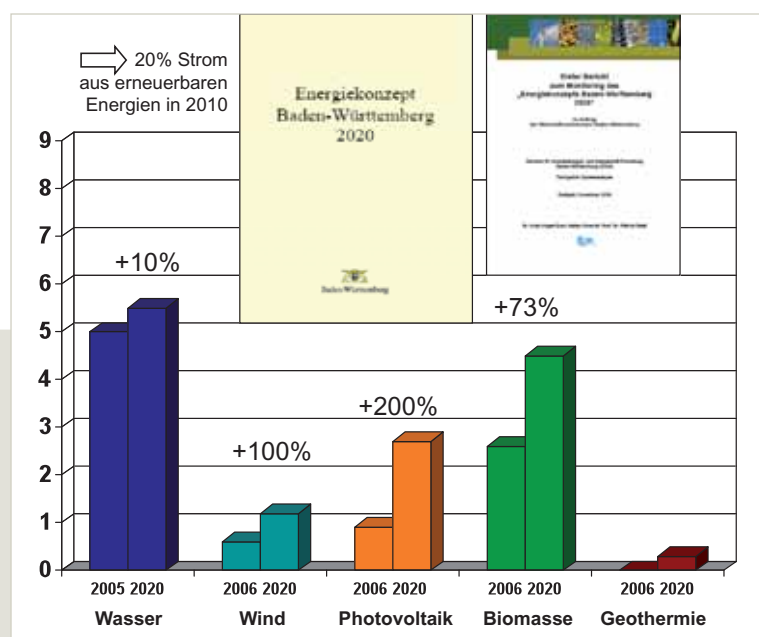
Das Ergebnis des ersten Berichts im Jahr 2009 ergab, dass die Entwicklung der Biomassenutzung im Land zum jetzigen Zeitpunkt sowohl im Strom- als auch im Wärmesektor dem notwendigen Ausbaupfad entspricht. Im Bereich der Windenergie sind hingegen zusätzliche Maßnahmen seitens des Landes erforderlich, um die Zielerreichung bis 2020 sicherzustellen. Dies trifft ebenso für die thermische Solarenergienutzung und die Kraft-Wärme-Kopplung in den Sektoren Nahwärme und Industrie zu.

Mit Hilfe von Workshops zu ausgewählten Schwerpunktthemen wird der Kenntnisstand zusätzlich erweitert, so dass jeweils aktuelle Empfehlungen erarbeitet werden, die das Wirtschaftsministerium bei der Umsetzung des Konzepts unterstützen.

// Monitoring Baden-Württemberg's "Energy Concept 2020"

The objective of this project is to support the Ministry of Economic Affairs in Baden-Württemberg by conducting the necessary monitoring of the targets set in their "Energy Concept 2020". For this purpose an annual report is produced. On the one hand it contains a documentation of Baden-Württemberg's progress in harnessing renewable energy for electricity and heat production and in the energy-efficiency sector with a special focus on combined heat and power (CHP). On the other hand it shows those areas where the targets set in the Energy Concept 2020 are difficult to reach. Backed by the results of focal workshops recommendations for further supporting measures are developed.

The project is running for three years, starting in 2009. The first, preliminary results for 2009 showed a strong necessity of measures for the use of wind energy for electricity production and CHP on a local basis and in its industrial use. The most successful areas are electricity and heat production from biomass as well as electricity production from photovoltaics.



// Contact

Dr. Antje Vogel-Sperl
E-Mail: antje.vogel-sperl@zsw-bw.de
Phone: +49(0)711 78 70-229

// Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik

Renewable Energy Statistics Working Group

// Monitoring des Ausbaus erneuerbarer Energien

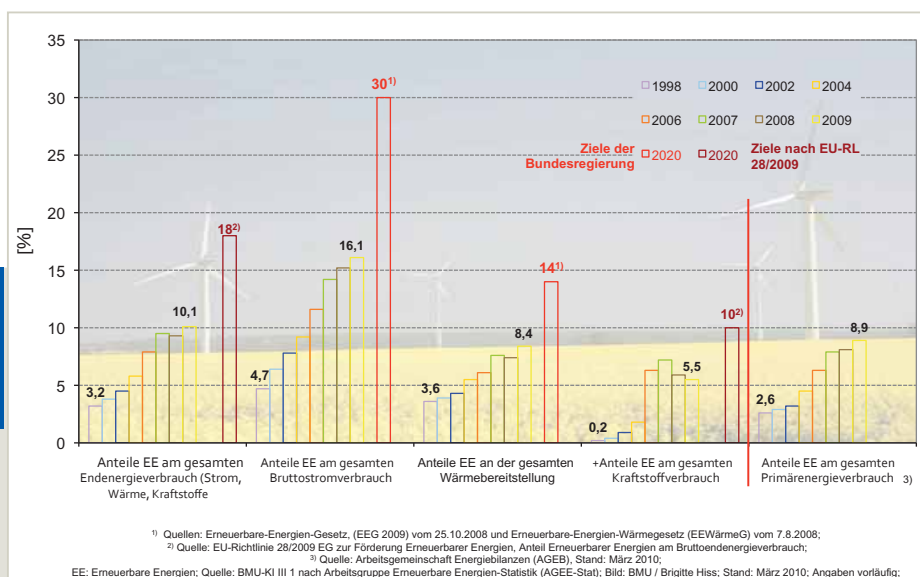
Energiepolitische Entscheidungen verlangen verlässliche Informationen über den aktuellen Zustand des Energiesystems. Ein fundiertes Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist deshalb die wichtigste Grundlage für die Ausgestaltung der weiteren Förderung. Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) ist ein unabhängiges Expertengremium, das vom Bundesumweltministerium (BMU) eingerichtet wurde und die Aufgabe hat, eine detaillierte Statistik über den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland zu erarbeiten und ständig zu aktualisieren. Damit unterstützt sie die Bundesregierung unter anderem bei der Erfüllung internationaler Berichtspflichten. Seit ihrer Gründung im Jahr 2004 koordiniert und leitet das Fachgebiet Systemanalyse die AGEE-Stat erfolgreich im Auftrag des BMU. Dieser Auftrag wurde 2009 um weitere sechs Jahre verlängert.

Das Monitoring gewinnt insbesondere vor dem Hintergrund anspruchsvoller nationaler Ziele sowie internationaler Vorgaben verstärkt an Bedeutung. So ist Deutschland nach der 2009 in Kraft getretenen EU-Richtlinie zur Förderung erneuerbarer Energien verpflichtet, bis zum Jahr 2020 einen Anteil von 18 % am gesamten Endenergieverbrauch zu erreichen. Gegenüber dem Jahr 2008 entspricht dies knapp einer Verdopplung. Für ein zukünftiges rechtzeitiges Nachsteuern und schließlich eine fundierte Dokumentation der Zielerreichung gegenüber der Europäischen Kommission sind belastbare und aktuelle Statistiken deshalb unverzichtbar.

// Monitoring the Development of Renewables in Germany

Well-grounded knowledge about the current usage of renewable energies has an increasing importance for political decisions. Since 2004, the Systems Analysis department takes the chair of the Renewable Energy Statistics Working Group (AGEE-Stat) by order of the German Ministry for the Environment. Therefore it is responsible for detailed monitoring of the development of renewables in Germany and backs the German Government with international reporting duties. In 2009, the assignment has been extended up to 2015.

// Anteile erneuerbarer Energien an der Energiebereitstellung in Deutschland
// Proportion of energy supplied in Germany from renewables



// Contact

Dr. Frank Musiol

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

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

// Windenergievorhersage

Wind Power Prediction

// Windenergievorhersage mit rekurrenten neuronalen Netzen

Der zunehmende Ausbau der Windenergie in Deutschland macht die Energieversorgung in stärkerem Maße vom Wetter abhängig. Deshalb haben Windkraftanlagen-Betreiber und Energieversorgungsunternehmen großes Interesse an möglichst genauen Vorhersagen über den voraussichtlichen Energieertrag. Diese Informationen werden unter anderem zur Anlagensteuerung, Netzstabilisierung oder für den Handel an der Energiebörse genutzt.

Die Basis für Windenergievorhersagen über Stunden und Tage stellen aktuelle Wettervorhersagen dar. Um auf die tatsächlich von einer bestimmten Anlage abgegebene Leistung zu schließen, haben sich maschinelle Lernalgorithmen bewährt. In den meisten aktuellen Vorhersagesystemen findet die Historie der Abweichungen zwischen Wettervorhersage und Leistung keine oder wenig Berücksichtigung, weil nur die letzte oder zumindest sehr wenige Wettervorhersagen in die Berechnung eingehen.

Das WinReNN-Projekt, das vom ZSW durchgeführt wird, gleicht dieses Manko aus, indem rekurrente neuronale Netze (RNN) verwendet werden, die derartige Abweichungen über lange Zeiträume modellieren können. Darüber hinaus modelliert das ZSW-System direkt eine zeitabhängige gemischte Wahrscheinlichkeitsdichte. Damit sind auch multimodale Fehlerverteilungen der Leistungsvorhersage möglich, ohne dass dazu auf aufwändige statistische Methoden wie die Verwendung ganzer Wettermodell-Ensembles zurückgegriffen werden muss. Rekurrente Netze sind dynamische Systeme und daher schwerer zu kontrollieren als statische Feed-Forward-Algorithmen. Andererseits eignen sie sich wegen ihres grundlegend anderen Verhaltens auch hervorragend für die Kombination mit existierenden Verfahren. Die vom ZSW bislang erreichte Vorhersagegenauigkeit liegt bereits gleichauf mit optimierten statischen neuronalen Netzen. In Kürze wird voraussichtlich der Prototyp eines neuartigen universellen Vorhersagesystems für Zeiträume zwischen 3 und 72 Stunden präsentiert werden können.

// Contact

Dipl.-Ing. Anton Kaifel

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

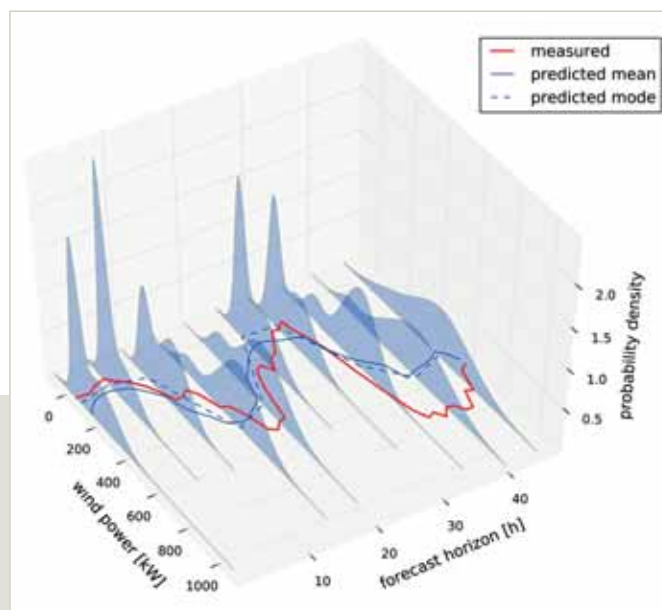
Phone: +49 (0) 711 78 70-238

// Wind Power Prediction Using Recurrent Neural Networks

As the impact of wind turbine generator (WTG) output on the power grids increases with each installed turbine, accurate estimates of wind energy yield on different forecast horizons gain importance, for applications ranging from grid stabilisation to trading.

Forecasts from operational Numerical Weather Prediction (NWP) form the basis for predicting wind power. Machine learning techniques have proven effective at forecasting the power output of wind turbine generators. However, predictions typically use a single input vector of NWP forecasts, disregarding the potentially informative history of previous inputs. We address these shortcomings by using mixture density recurrent neural networks (RNNs) to forecast a time-dependent probability distribution over power outputs. As dynamical systems, RNNs are inherently more difficult to control than stationary, feed-forward methods. On the other hand, their behaviour being radically different from both static methods and traditional time series analysis makes them ideal for combination with existing methods.

We have already achieved prediction accuracy on par with a well-tuned feed-forward network approach, and will demonstrate good performance on short- and long-term predictions shortly.



// 48-h-Leistungsvorhersage mit modellierten Wahrscheinlichkeiten
// 48-h power prediction with modelled probability densities

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

// Unsere Kernkompetenzen

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

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

Für den Einsatz von flexiblen Substratmaterialien anstelle des Glassubstrates wurde ein zweites Technikum für eine Rolle-zu-Rolle-Beschichtung von flexiblen CIGS-Modulen aufgebaut (Arbeitsgruppe FLEXIS).

Neue kostengünstige Depositionsverfahren wie Drucktechnologien werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme weiterentwickelt (Arbeitsgruppe NEMA).

// Our Main Focus

The use of thin-film technologies for photovoltaic solar modules offers a great potential for cost reduction. Especially the technology based on copper, indium, gallium and selenium (CIGS) has proven its worth in series production with high efficiencies and highly developed manufacturing technology.

The in-house CIGS pilot line is the heart of the MAT laboratory. It includes all of the machines and systems required to manufacture complete thin-film solar modules. All processing steps from glass substrate conditioning to connecting lead cables are available. The systems are already designed for in-line processing and are therefore very relevant for industrial processes (FACIS group).

A second pilot line, designed for the roll-to-roll production of flexible CIGS modules, has been established. It uses flexible substrate materials instead of glass (FLEXIS group).

New, low-cost deposition techniques like printing technologies are being further developed for organic and inorganic photovoltaic semiconductor systems and new materials are being studied (NEMA group).



// Contact

Dr. Wiltraud Wischmann

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

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

// Wirkungsgrade bei CIGS-Dünnschicht-Solarzellen

The Efficiency of CIGS Thin-Film Solar Cells

// Mit Effizienz zum Europarekord

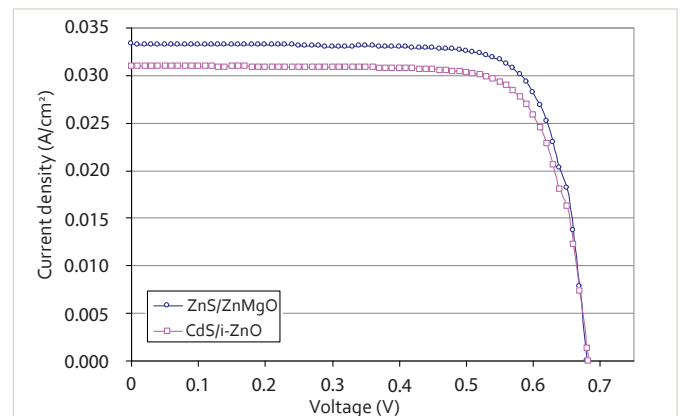
Im Vergleich aller Dünnschicht-Technologien weist das CIGS-Materialsystem die höchsten Wirkungsgrade auf. Die mit statischen Prozessen erreichten Bestwerte werden in der ZSW-Technikumslinie mit einer Fläche von 30 cm x 30 cm erfolgreich auf einen industriell relevanten Durchlaufprozess übertragen. In diesem vom Bundesumweltministerium und der Firma Würth Solar geförderten Vorhaben unterstützt das ZSW als Forschungs- und Innovationspartner die Firma Würth Solar bei ihrer weiteren Optimierung der CIGS-Fertigungstechnologie am Standort Schwäbisch Hall.

Da die Herstellung des CIGS-Absorbers einer der kostenbestimmenden Fertigungsschritte in der Produktion ist, kommt der weiteren Steigerung des Wirkungsgrades eine große Bedeutung zu. Daher werden die CIGS-Prozesse am ZSW, die auf einer Koverdampfung der Elemente Cu, In, Ga und Se basieren, sowohl in einer statischen Kleinzellenlinie als auch auf der industrienahen Durchlaufanlage kontinuierlich weiter optimiert. An beiden Anlagen werden nun Wirkungsgrade $\geq 19\%$ erreicht (Testzellen $0,5\text{ cm}^2$): Im statischen Prozess erreichen wir $19,0\%$ (ohne Antireflexschicht = ARC) und an der Durchlaufanlage gelang mit einer modifizierten mehrstufigen Prozessführung eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades von $18,4\%$ auf $19,6\%$ (mit ARC) – europaweit ein Rekordwert. Abbildung oben: Teststreifen mit Rekordzelle aus der Durchlaufanlage des ZSW (zertifiziert durch das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme).

Eine bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums im kurzwelligen Bereich ist durch die Modifikation des n-Kontaktes von Kadmiumsulfid/Zinkoxid (CdS/i-ZnO) zu Zinksulfid/Zink-Magnesium-Oxid (ZnS/ZnMgO) erzielbar (höhere Stromdichte, siehe Abbildung rechts). Der Wirkungsgrad erhöht sich um mehr als einen Prozentpunkt von $16,2\%$ auf $17,5\%$ (ohne Antireflexschicht).

// CIGS Thin-Film Solar Cells

The CIGS (Cu-In-Ga-Se) material system exhibits the highest efficiencies of all thin-film technologies. Up to now, the record cells were prepared only in laboratory equipment using batch processing steps. ZSW has been able to successfully transfer the laboratory processing steps to an industrially relevant inline system with a substrate size of up to 30 cm x 30 cm. We could further increase the conversion efficiency of test cells ($0,5\text{ cm}^2$) above 19% with CIGS absorber films from both our static lab equipment and the inline plant. In fact, a new European record was achieved with $19,6\%$ efficiency (test cell $0,5\text{ cm}^2$ with antireflective coating) for the inline process. In addition, alternative buffer systems with a better response in the blue wavelength range of the solar spectrum will lead to further improvements in the near future.



// Vergleich der IU-Kennlinien von CIGS-Solarzellen mit ZnS/ZnMgO und CdS/i-ZnO Puffer (ohne Antireflexschicht)

// Comparison of IV curves of CIGS solar cells with ZnS/ZnMgO and CdS/i-ZnO buffer layer (without ARC)

// Contact

Dr. Wiltraud Wischmann

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

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

// Dipl.-Phys. Richard Menner

Durch die Entwicklung neuer Prozessvarianten haben wir den Wirkungsgrad von Photovoltaikmodulen deutlich erhöht und damit gleichzeitig den industriellen Produktionsprozess optimiert.

By developing new process variants we have significantly increased photovoltaic module efficiency and at the same time optimised the industrial production process.

”



// Dünnschicht-Solarmodul auf flexiblem Baustahl

Thin-Film Solar Module on Flexible Mild Steel



// Flexible Entwicklungsmöglichkeiten

In der FLEXIS-Gruppe wurden Diffusions- und Isolationsbarrieren für CIGS-Dünnschicht-Solarzellen auf Baustahlsubstrat entwickelt und untersucht. Unter anderem sollte ein CIGS-Modul auf leitfähigem Baustahl hergestellt werden, da Baustahl deutlich günstiger ist als die bisher eingesetzten flexiblen Trägermaterialien wie Edelstahl oder Polyimid. Ziel war es, eine elektrisch isolierende Schicht zwischen Baustahl und CIGS-Zellen abzuscheiden, um auf dem sonst leitfähigen Baustahlsubstrat eine monolithisch integrierte Serienverschaltung der Zellen zum Modul zu ermöglichen.

Eine große Herausforderung bestand darin, die Isolationsschicht so zu optimieren, dass sie den industriellen Fertigungsprozess übersteht. Außerdem muss das Eindringen (Diffusion) von Fremdelementen aus dem Baustahl in die CIGS-Schicht verhindert werden, da schon kleinste Mengen fremden Materials in der Halbleiterschicht den Wirkungsgrad senken können. Dieser Effekt ist bei Baustahl noch ausgeprägter als bei dem sonst verwendeten Edelstahl. Das Leibniz-Institut für Neue Materialien (INM) in Saarbrücken entwickelte in Zusammenarbeit mit dem ZSW eine wenige Mikrometer dünne Isolations- und Diffusionsbarriere, die die genannten Anforderungen erfüllt.

So gelang es dem ZSW erstmalig, ein voll funktionsfähiges CIGS-Dünnschicht-Solarmodul auf einem 0,5 mm dicken Baustahlblech mit einem Wirkungsgrad von 8,6 % (zertifiziert am Fraunhofer ISE), einer Leerlaufspannung von 6,4 V und einer aktiven Fläche von 47 cm² herzustellen.

// Thin-Film Solar Module on Flexible Mild Steel

The FLEXIS group has developed and characterised insulating diffusion barrier layers for CIGS thin-film solar cells on mild steel substrates. The advantage of producing CIGS modules on conductive mild steel is that this substrate is much cheaper than the more commonly used flexible substrate foils like stainless steel or polyimide. In order to process modules with monolithically integrated series connection of the cells, an electrically insulating layer must be deposited between the mild steel and the CIGS cells.

One great challenge was to optimise the insulating layer so that it can withstand the subsequent industrial processing steps. Furthermore, the diffusion of detrimental substrate elements into the CIGS layer must be prevented, as even slight amounts of impurities in the semiconductor layer may decrease cell efficiency. This effect is much more pronounced for mild steel as compared to commercially used stainless steel. The Leibniz Institute for New Materials (INM) in Saarbrücken, in cooperation with ZSW, developed a thin insulating diffusion barrier which is only a few microns thick and which fulfils the aforementioned requirements.

As a current best result, ZSW produced an efficient CIGS thin-film solar module on a 0.5-mm-thick mild steel sheet with an efficiency of 8.6 % (certified by Fraunhofer ISE), an open-circuit voltage of 6.4 V, and an active area of 47 cm².

// Contact

Dr. Roland Würz

E-Mail: roland.wuerz@zsw-bw.de

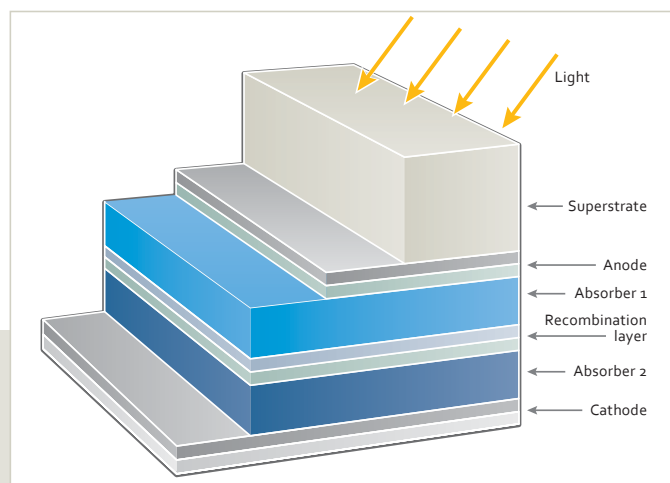
Phone: +49 (0)711 78 70-220

// Organische Tandemsolarzellen

Organic Tandem Solar Cells

// Nutzung des Sonnenspektrums

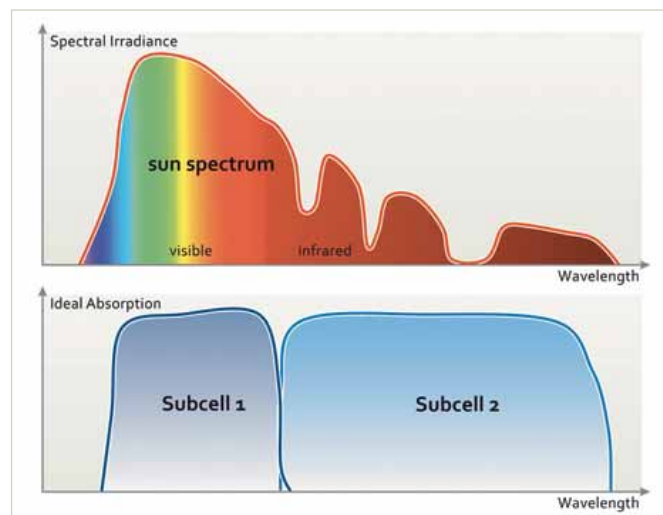
Organische Solarzellen bestehen aus Werkstoffen der organischen Chemie, also aus Kohlenwasserstoffverbindungen. Da diese Art der Solarzellen eine erhebliche Senkung der Herstellungskosten von Dünnschicht-Solarmodulen versprechen, werden sie weltweit und vor allem auch durch das ZSW intensiv erforscht. Diese photovoltaischen Bauelemente können ohne aufwändige und teure Vakuumtechnik durch schnelle und einfache Druckprozesse realisiert werden. Um den vergleichsweise geringen Wirkungsgrad dieses Zelltyps zu steigern, möchte man das Sonnenspektrum durch sogenannte Tandemstrukturen optimal nutzen. Hierzu werden zwei Einzelzellen mit unterschiedlichem spektralem Empfindlichkeitsbereich direkt übereinander aufgebracht („Tandem“), um bei gleichem Strom die nutzbare Zellspannung idealerweise zu verdoppeln. Dadurch sollten Wirkungsgrade von mehr als 10 % möglich werden. Das ZSW arbeitet im Verbund mit anderen Partnern innerhalb des BMBF-Projektes EOS (Entwicklung innovativer polymerer Solarzellen für Energieautonome Systeme) an der Realisierung organischer Tandemzellen. Chemiepartner entwickeln neuartige Hochleistungs-Polymere mit verbesserter Empfindlichkeit, während das ZSW die Zellarchitektur und die Kontaktschichten erforscht.



// Schematischer Aufbau einer Tandemzelle
// Device structure of a tandem cell

// Exploitation of the Sun Spectrum

Organic solar cells promise low-cost vacuum-free printing processes enabling a very fast deposition. However, current standard polymer single cells are limited to efficiencies around 5-6 %. Hence, new polymers with higher absorption (smaller band gap) are needed! Tandem concepts comprising two stacked subcells for a better exploitation of the sun spectrum are being developed, using two polymers with complementary absorption spectra. The efficiencies are expected to go beyond 10 % for such systems. Currently, organic tandem solar cells are investigated and developed in close cooperation with various partners within the BMBF project EOS including chemists synthesising optimised absorber materials. Promising results have been obtained with subcells connected in series. The ZSW is focusing on interface engineering with respect to the back, front and intermediate contacts and the overall cell architecture.



// Sonnenspektrum und ideale Empfindlichkeit einer Tandemzelle
// Spectral irradiance across the sun spectrum and the ideal absorption of the sunlight by the two subcells of organic tandem cells

// Contact

Dipl.-Phys. Jonas Hanisch
E-Mail: jonas.hanisch@zsw-bw.de
Phone: +49(0)711 78 70-234

// Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen (MSA)

Photovoltaics: Modules Systems Applications (MSA)

// Unsere Kernkompetenzen

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

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

Weitere Arbeitsgebiete sind die Netzeinbindung von Photovoltaiksystemen in Verbindung mit elektrochemischen Speichern und die Gebäudeintegration von Photovoltaikmodulen.

// Our Main Focus

The MSA experts conduct comparative investigations on performance and yield as well as long-term stability of photovoltaic modules and systems under real operating conditions at the ZSW outdoor testing facility in Widderstall. Module stability is also examined with accelerated aging tests. To this end, the team tests photovoltaic modules in laboratory and outdoor experiments under extreme stress (temperature, humidity, voltage, irradiation etc.). Results from accelerated aging tests are correlated with degradation effects under normal operating conditions. The results are analysed in detail with materials research methods (surface analysis, scanning electron microscopy etc.). The new **Solab** offers specialised know-how in the area of thin-film technologies.

The team's consulting expertise includes due diligence evaluations of planned large systems on behalf of financing banks as well as site evaluations, yield forecasts, photovoltaic system design and the quality control of photovoltaic systems.

Further areas of expertise are grid integration of photovoltaic systems and generators in combination with electrochemical storage systems and building integration of photovoltaic modules.

 **Solab**
ZSW Photovoltaik-Testlabor

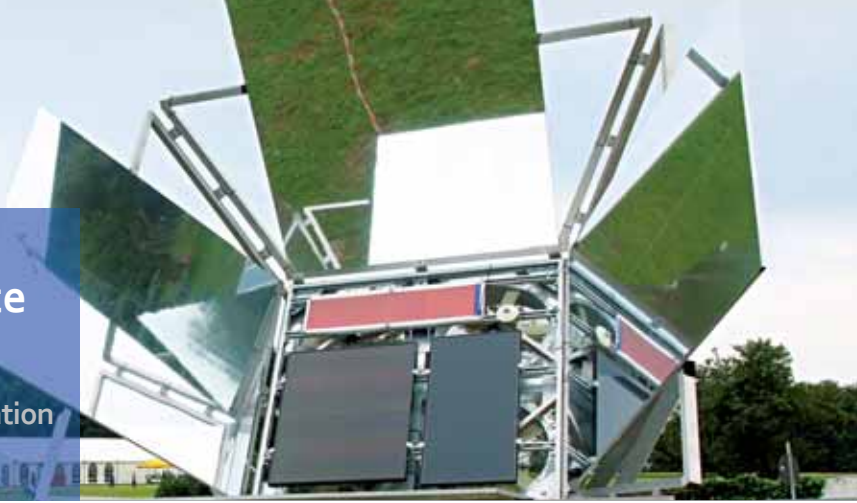


// Contact

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

// Solar-Tracker und verbesserte Modulcharakterisierung

Solar Tracker and Improved Module Characterisation



// Charakterisierung von Dünnschicht-Solarmodulen

Qualität, Lebensdauer und Effizienz von Photovoltaikanlagen hängen von vielen Faktoren ab. Optimale Untersuchungsergebnisse liefert dafür das europaweit größte Testfeld für Solarmodule Widderstall. Anlässlich des 20-jährigen Jubiläums erweiterte das ZSW die Anlage auf der Schwäbischen Alb mit einem neuen Prüfstand: Der „Solar-Tracker“ für beschleunigte Alterungstests im Freiland wird zweiachsig nachgeführt. Durch vier große Spiegel konzentriert er das Sonnenlicht in der Modulebene um den Faktor drei. Der Jahresenergieertrag von Photovoltaikmodulen ist ein wissenschaftlich noch nicht abschließend behandeltes Thema. Zur genauen Analyse werden die Dünnschichtmodule an eine spezielle Last angeschlossen, welche im festen Zeitraster die I/U-Kennlinien ermittelt und zwischenzeitlich im Punkt maximaler Leistung arbeitet. Durch Auswertung der Einzelmessungen kann eine Charakterisierung des Moduls über den gesamten Betriebsbereich abgeleitet werden. Die Teststände für Messungen an Einzelmodulen und Generatoren wurden wesentlich erweitert und stehen nun für vergleichende Untersuchungen der verschiedenen Technologien zur Verfügung.

// Prüfung und Bewertung von Photovoltaikmodulen und -Systemen

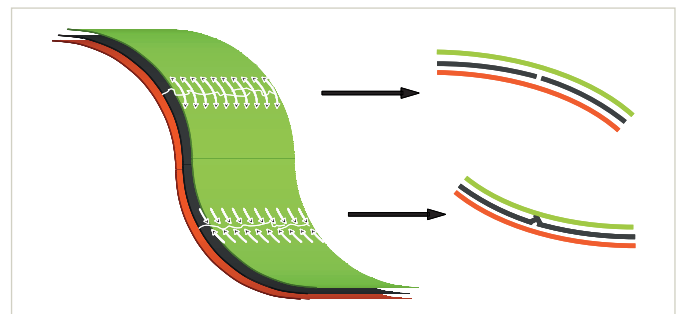
Im Rahmen des EU-Projekts PERFORMANCE wurden durch das ZSW Methoden zur Bewertung von Photovoltaikmodulen hinsichtlich Leistung, Ertrag und Langzeitstabilität verbessert und vereinheitlicht, um so für eine größere Transparenz im Photovoltaikmarkt zu sorgen. Dies gilt vor allem für die neu verfügbaren Dünnschicht-Technologien. Außerdem hat das ZSW Vorschläge für eine Ergänzung der bislang für Photovoltaikmodule geltenden Prüfnormen erarbeitet, die für neuartige, flexible Photovoltaikmodule bei der Gebäudeintegration gelten sollen. Flexible Module, die kein Glas enthalten, beseitigen zwar alle Gefährdungen, die von gebrochenen Glasscheiben ausgehen könnten; andererseits können bei der Gebäudeintegration mechanische Dehn- und Biegespannungen auftreten, welche unter Umständen den elektrischen Energieertrag reduzieren. Erste Entwürfe für Dehn-, Biege- und Eindrücktests sind bereits vom ZSW erarbeitet worden.

// Characterisation of Thin-Film Solar Modules

The quality, lifetime and efficiency of photovoltaic systems can be qualified through expert investigations at Europe's largest test facility for solar modules in Widderstall. The ZSW inaugurated a solar tracker for accelerated outdoor ageing tests. Four large mirrors concentrate the sunlight by a factor of three in the module plane. Specially developed techniques are applied to accurately determine the annual energy yield of photovoltaic modules.

// Testing and Evaluating Photovoltaic Modules and Systems

Within the EU project PERFORMANCE, methods for the evaluation of photovoltaic modules were improved and standardised in order to achieve a higher degree of transparency in the photovoltaic market. A special focus was on the newly available thin-film technologies. Furthermore, the ZSW developed recommendations for supplementing the current testing standards for their application to the new, flexible photovoltaic elements in building integration. Modules without glass can exhibit mechanical tensile and bending stresses which may reduce the electric energy yield. For this reason, the ZSW developed some designs for tension, bending and indentation tests.



// Zugspannungen (oben) und Druckspannungen (unten) durch das Biegen von flexiblen Modulen (zweidimensionaler Lastfall) und Zerstörung der Absorberschicht (dunkelgrau). Rechts die Seitenansicht: die Absorberschicht ist jeweils in der Mitte, Träger unten (orange), Abdeckung oben (hellgrün).

// Tensile stress (above) and compression stress (below) caused by bending flexible modules (two-dimensional load case) can damage the absorber layer (dark grey). A side view is shown on the right with the absorber layer in the middle, the substrate below (orange), and the cover layer above (light green).

// Dipl.-Phys. Hans-Dieter Mohring

Wir entwickeln verlässliche Mess- und Prüfkriterien, die auch für neue Technologien wie z.B. die CIS-Dünnschichtmodule präzise Ergebnisse ermöglichen.

We develop reliable measuring and test criteria to enable precise and reliable results even for novel technologies such as CIS thin-film modules.

”



// 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“ Energieträger zu überführen und zu speichern
- > Erneuerbare Energieträger wie Biomasse 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 konventionelle Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstofferzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

REG-Schwerpunktthemen sind:

- > Thermochemische Konversion biogener Ressourcen
- > Brennstoffreformierung /-synthese
- > Innovative Speicherkonzepte für regenerativ erzeugten Strom („Wind-to-SNG“)

// 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” energy carrier
- > To generate electricity with high efficiency using hydrogen or hydrogen-rich gas produced from renewable energy carriers like biomass

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

REG focuses on:

- > Thermochemical conversion of biomass
- > Fuel reforming/fuel synthesis
- > Innovative energy storage concepts for renewable electricity (“wind-to-SNG”)



// Contact

Dr. Michael Specht

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

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

// Basic Engineering

// Auslegung von Kraftwerks- und Syntheseprozessen zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoff aus erneuerbarer Energie

Für eine möglichst nachhaltige und effiziente Nutzung erneuerbarer Ressourcen stellt die Prozess-Simulation von Anlagen mit der Analyse der Massen- und Energieströme ein wichtiges Instrument dar. Sowohl die Systemeffizienz als auch die Wirtschaftlichkeit können für verschiedene Prozess- und Verschaltungsvarianten unter variablen Betriebsbedingungen (Sensitivitätsanalyse) vorab quantifiziert werden, um Empfehlungen für das Anlagenengineering und die Betriebsweise zu treffen.

Zu diesem Zweck wird am ZSW die kommerziell verfügbare Software IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment) eingesetzt. Aufbauend auf Standard-Anwendungsbibliotheken zur Prozess-Simulation von thermischen Kraftwerks- und thermochemischen Konversionsprozessen konzentriert sich das Fachgebiet REG auf die Adaption und Verschaltung von Prozesskomponenten sowie auf die Implementierung eigener Bibliotheken und Modelle. Hierbei werden Kraftwerks- und Syntheseprozesse zur Erzeugung von Strom, Wärme und Kraftstoff aus regenerativen Ressourcen simulationstechnisch abgebildet. Ein Fokus liegt auf verschiedenen Verfahren zur Erzeugung von SNG (Substitute Natural Gas) und Wasserstoff (H_2) wie beispielsweise:

- > Biomass-to-BioSyngas (Güssing- und AER-Verfahren, Bioliq®-Prozess)
- > BioSyngas-to-SNG
- > BioSyngas-to- H_2
- > BioSyngas-to-Power (Verstromung durch Gasmotoren, Brennstoffzellensysteme und ORC-Prozesse)
- > Biogas-to-SNG
- > Wind-to-SNG (Speicherung fluktuierender erneuerbarer Elektrizität, z.B. aus Windkraft)

// Biomass-to-BioSyngas-to-SNG – Prozessverschaltung zur Polygeneration von SNG, Strom und Wärme durch Vergasung von Biomasse mit AER-Technologie

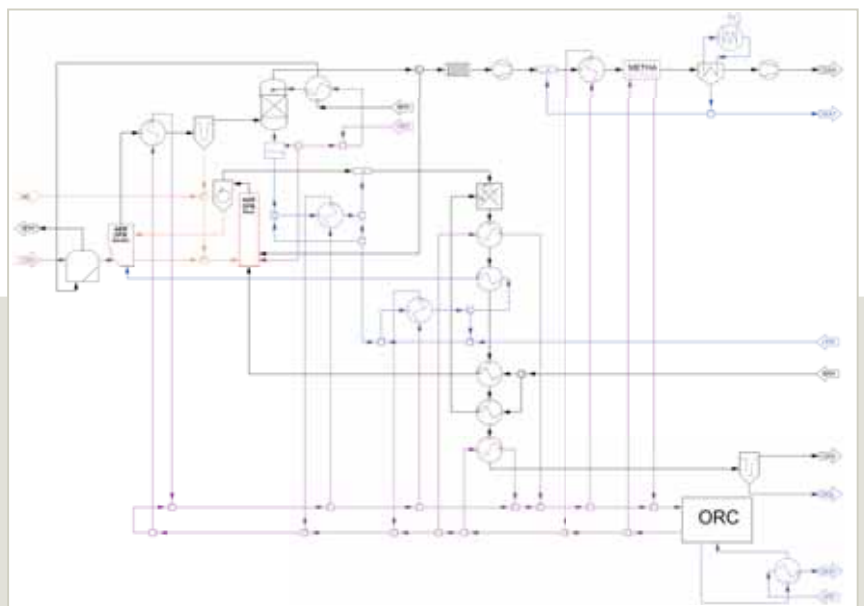
// Biomass-to-BioSyngas-to-SNG – process flow sheet for polygeneration of SNG, power and heat via AER biomass gasification

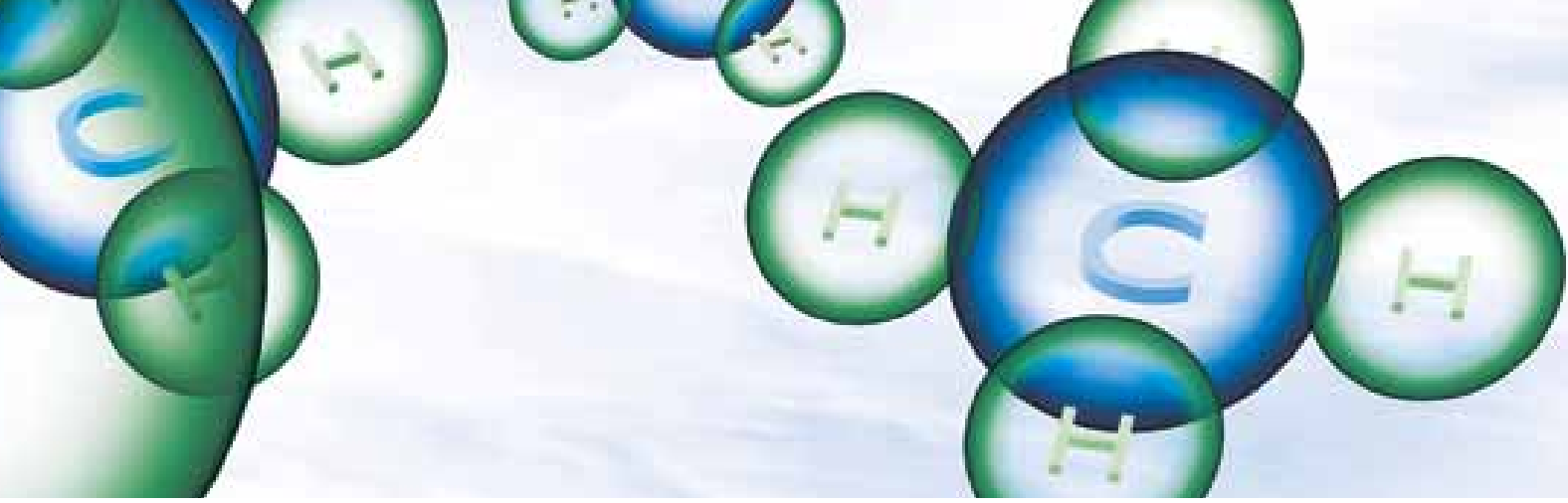
// Process Design for the Generation of Power, Heat and Fuel from Renewable Energy Resources

In order to provide a sustainable and efficient energy supply with regard to power, heat, and fuel, process simulation is a well established method at ZSW. Different process designs are analysed by means of mass and energy balances to quantify system efficiencies and sensitivities. This provides essential data for the basic engineering of new plants and for the optimisation of operating plants.

Employing the commercial simulation software IPSEpro (Integrated Process Simulation Environment), ZSW simulates various process designs for the cogeneration and polygeneration of power, heat and fuel. Special focus of the department "Renewable Fuels and Processes" (REG) is the generation of fuels like Hydrogen or Substitute Natural Gas (SNG) from renewable resources, in particular:

- > Biomass-to-BioSyngas (Güssing und AER Process, Bioliq®-Process)
- > BioSyngas-to-SNG
- > BioSyngas-to- H_2
- > BioSyngas-to-power (power via gas motor, fuel cell systems and ORC process)
- > Biogas-to-SNG
- > Wind-to-SNG (storage of fluctuating renewable electricity, e.g. from wind power)



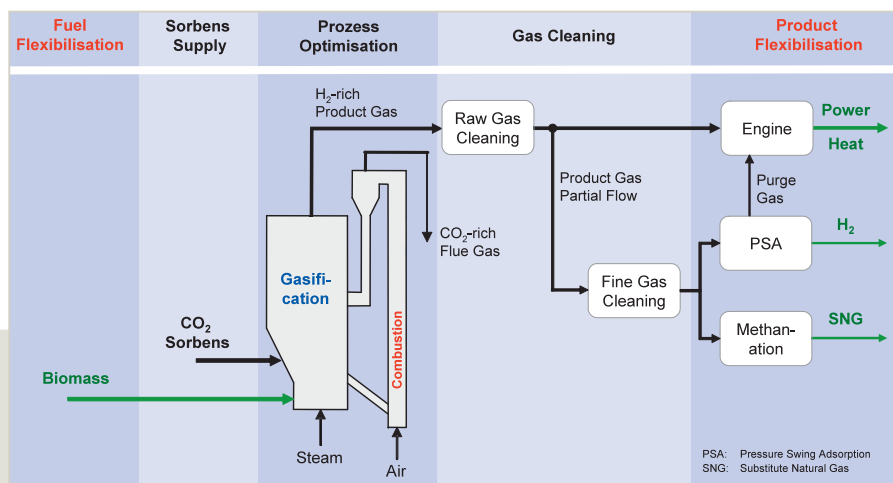


Somit ermöglicht die AER-Vergasung beispielsweise die Herstellung eines einspeisefähigen Erdgassubstituts (SNG) über eine nachgeschaltete Methanisierungsstufe, wobei die sonst üblichen Prozessschritte zur CO-Konvertierung und CO₂-Abtrennung entfallen. Die Gesamtkette zur SNG-Herstellung aus Biomasse wird damit zugunsten von Effizienz und Kosten deutlich vereinfacht – eine wichtige Voraussetzung für die dezentrale und nachhaltige Polygeneration von Strom, Wärme und Kraftstoff.

In Verbindung mit der innovativen AER-Vergasungsanlage etabliert das ZSW derzeit die FuE-Plattform „BtG“. Neben der Initiierung und Durchführung von FuE- und Demonstrationsprojekten ist ein erklärtes Ziel der FuE-Plattform die Bündelung industrieller und institutioneller Kompetenzen auf den Gebieten Biomassebereitstellung, AER-Vergasung und Produktgasnutzung. Letztere schließt die Qualifizierung und Demonstration innovativer Verfahren mit einem realen Vergasungsgas ein – ein besonderes Alleinstellungsmerkmal der BtG-Plattform, das die Entwicklung und Markteinführung dieser Technologien beschleunigen wird.

In connection with this innovative gasification plant, research and development (R&D) activities shall be combined in a R&D platform “BtG” (Biomass-to-Gas), which is established at present.

Topics besides networking are, e.g., the optimisation of the gasification process itself as well as its flexibility towards biomass resources and product gas utilisation. The latter covers tests of new process units/prototypes with a real product gas, pushing technology development and market introduction – a high unique feature for researchers and industrial partners.



// Contact

Dr. Michael Specht

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

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

// Schwerpunktthemen der FuE-Plattform „BtG“

// Topics of the R&D platform “BtG”

// Akkumulatoren (ECA)

Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet „Akkumulatoren“ beschäftigt Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker aus den Fachrichtungen Elektrochemie, Physik und Elektrotechnik/Elektronik.

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

Die Aktivitäten des Fachgebietes lassen sich in folgende Arbeitsschwerpunkte unterteilen:

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

Mit den ZSW-Kollegen aus der Materialforschung Akkumulatoren und dem Bereich der Brennstoffzellen wird eine sehr enge Zusammenarbeit gepflegt, so dass auch arbeitsteilig gemeinsame Projekte bearbeitet werden.

// Our Main Focus

The “Accumulators” department employs scientists, engineers and technicians in the fields of electrochemistry, physics and electrotechnology/electronics.

The department is mainly tasked with investigating and further developing energy storage systems, whereby the main focus of this work is on their characterisation under different operating conditions as well as investigating behaviour with incorrect use and in accident situations. Other tasks include determining the status of the system (state of charge, aging), predicting the system performance capability, thermal and electrical modelling as well as simulating batteries and battery components.

The department’s activities can be divided into the following areas:

- > Battery tests
- > Safety testing for batteries
- > Battery system technology
- > Thermal and electrical battery modelling and simulation
- > Further training

There is very close collaboration with the ZSW colleagues from the Accumulators Materials Research and Fuel Cells departments, including the carrying out of joint projects.



// Contact

Dr. Harry Döring

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

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

// Speichersysteme

Storage Systems

// Charakterisierung von Speichersystemen

Zuverlässige und langlebige Speichersysteme sind eine Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz in bestehenden und neuen Märkten wie photovoltaischen Inseln oder Elektrofahrzeugen. Die Charakterisierung der Speichersysteme beinhaltet mehrere Aspekte wie die Bestimmung der Leistungsfähigkeit, die Ermittlung der Lebensdauer oder messtechnische Untersuchungen zur Sicherheit.

Derzeit zeigt sich ein starker Trend hin zu Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeugantriebe, aber auch für stationäre photovoltaische Systeme. Stehen bei Fahrzeugbatterien Messungen mit großen spezifischen Leistungen im Mittelpunkt, so treten bei Photovoltaiksystemen in der Regel spezifische Leistungen auf, die etwa um den Faktor 100 kleiner sind. Neben Untersuchungen zur Kapazität und zum Innenwiderstand bei unterschiedlichen Bedingungen werden auch Wirkungsgradmessungen und Messungen zur Ruhespannungscharakteristik durchgeführt. Mit Hilfe systematischer Alterungstests unter verschiedenen Betriebsparametern werden Lithium-Ionen-Batterien mit unterschiedlichen Elektrodenmaterialien untersucht, um Aussagen zur Lebensdauercharakteristik zu erhalten.

Neben der Bestimmung der elektrischen Parameter der Batterie ist auch ihr Verhalten in Extremsituationen (mechanisch, elektrisch, thermisch) von größter Bedeutung, um ein mögliches Gefahrenpotenzial abzuschätzen und entsprechende Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Wachsende Bedeutung gewinnen diese Untersuchungen insbesondere für die Realisierung der Elektromobilität, da hier Speicher mit einem deutlich größeren Energieinhalt (10-50 kWh) zum Einsatz kommen werden. Am ZSW werden deshalb Sicherheitstests nach entsprechenden Vorschriften und Standards oder unter spezifischen, mit dem Partner abgestimmten

Testbedingungen durchgeführt. Die Ausführung der Tests dient sowohl der Qualifizierung eines fertigen Produktes wie auch zur frühzeitigen Aufdeckung von Schwachstellen in der Entwicklungsphase. Dafür wird am ZSW ein geeigneter Testbunker betrieben, der über eine Feuerlöschanlage, eine Gaswäsche, Videoüberwachung sowie die Datenaufzeichnung der elektrischen, mechanischen und thermischen Größen verfügt. Verschiedene Emissionen können über die Entnahme von Gasproben für die spätere Analytik erfasst werden.

// Characterisation of Storage Systems

Testing of Li-ion batteries for electric vehicles and for photovoltaic stand-alone applications is of increasing interest. 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. This gains in importance in particular for the realisation of electric mobility, because a significantly larger energy content of the batteries (10-50 kWh) is applied. Safety tests are carried out according to existing standards or according to an agreed procedure with a partner. Thus not only the final product can be qualified, but useful results are generated already during system development.

At ZSW a test bunker was installed, equipped with a fire extinguisher system, an exhaust system connected with a gas washer, video observation and thermal image recording in order to measure and store the electrical, thermal and mechanical data. Emissions can be measured by installed sensors or via gas sampling and later analysis.

// Dr. Harry Döring

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

We test accumulators under extreme conditions and thus quickly establish their safeness, durability and degree of quality.

// Akkumulatoren Materialforschung (ECM)

Accumulators Materials Research (ECM)

// Unsere Kernkompetenzen

Neue Materialien sind der Schlüssel für leistungsfähige Speichersysteme in Elektrofahrzeugen. Neben der Energiedichte sind insbesondere die Anforderungen an Leistung, Lebensdauer, Sicherheit und Kosten sehr hoch. Das ZSW arbeitet in enger Zusammenarbeit mit Materialherstellern, Batteriefirmen und Anwendern an der Erforschung und Optimierung neuer Batteriematerialien.

Für das interdisziplinäre Team aus ca. 35 Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern steht die Erforschung und Charakterisierung neuer Materialien und Komponenten für Lithium-Ionen-Batterien und Superkondensatoren für automobiler Anwendungen im Mittelpunkt ihrer Arbeiten. Von Anfang an gehören Untersuchungen zu Alterungsmechanismen und zur Abschätzung des Sicherheitsverhaltens mit zum Aufgabenspektrum, die dazu beitragen sollen, zukünftige Speichersysteme noch zuverlässiger und sicherer zu machen. Um einen schnellen Transfer der Forschungsergebnisse in die Entwicklung praxisrelevanter neuer Systeme zu gewährleisten, ist ein weiterer Schwerpunkt der Arbeitsgruppe das Scale-up von Synthese- und Beschichtungsprozessen. Der Aufbau einer kompletten Pilotproduktionslinie für Wickel- und Flachzellen erlaubt angepasste vorindustrielle Prozessentwicklungen für neuartige Komponenten und damit leistungsfähigere zukünftige Zellgenerationen. Ergänzt wird das Aufgabenspektrum durch Post-Mortem-Analysen und die Fehlersuche an kommerziellen Batteriesystemen.

// Our Main Focus

New materials provide the key to powerful storage systems in electric vehicles. In addition to the energy density, there are also very high demands in terms of the performance, service life, safety and costs. ZSW works closely together with material manufacturers, battery companies and users in researching and optimising new battery materials.

The work of the interdisciplinary team, which comprises around 35 scientists, engineers and technicians, is focussed on researching and characterising new materials and components for lithium-ion batteries and supercapacitors for automotive applications. Investigating aging mechanisms and assessing safety behaviour right from the beginning belong to the range of tasks that should help storage systems become even more reliable and secure in the future. In order to ensure that the research findings are quickly transferred to the development of new systems relevant to practice, a further focus of the working group is on scaling up synthesis and coating processes. The development of a complete pilot production line for winding and flat cells enables pre-industrial process developments to be adapted for new kinds of components, thus achieving more powerful cell generations in future. The range of tasks is supplemented with postmortem analyses and troubleshooting commercial battery systems.



// Contact

Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens

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

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

// Li-Ionen-Batterien

Li-Ion Batteries

// Redox-Shuttle-Additive für Li-Ionen-Batterien

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb der Initiative „LIB 2015“ geförderten Projektes „Li-Redox“ werden gemeinsam mit zwei Industriepartnern neuartige Redox-Shuttle-Additive als Überladeschutz entwickelt und auf ihre Einsatzmöglichkeit in realen Zellen getestet.

Bei Redox-Shuttle-Additiven handelt es sich um Moleküle, die dem Elektrolyten zugesetzt werden und die bei einem bestimmten Potenzial an der positiven Elektrode oxidiert werden. Die oxidierte Form des Moleküls wandert in Folge zur negativen Elektrode, wo sie in die Ausgangsform zurückreduziert wird und dann wieder zur positiven Elektrode wandert. Somit wird bei Erreichen des Oxidationspotenzials des Redox-Shuttle-Additivs ein reversibler Prozess gestartet, der das Potenzial der positiven Elektrode „fixiert“ und einen weiteren Anstieg der Zellspannung verhindert. Der Ladestrom fließt nicht länger in eine weitere Ladung der Elektroden, sondern in die Oxidation (und Reduktion) des Redox-Shuttle-Additivs. Dieser Effekt kann z.B. als Überladeschutz für die Zelle eingesetzt werden oder als Möglichkeit zur Äquilibration von Zellen in Serienschaltungen während des Ladevorganges.

Zur Charakterisierung der neuen Additive und zur Aufklärung der zugrunde liegenden Mechanismen werden experimentelle elektrochemische Untersuchungen mit computerunterstützter Modellierung kombiniert.

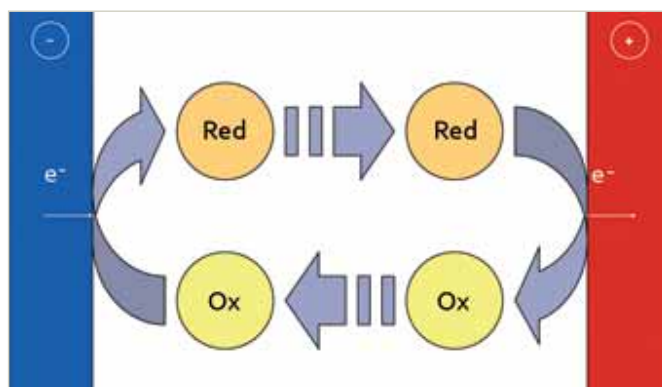
// Redox Shuttle Additives for Li-Ion Batteries

As part of the “Li-Redox” project, new redox shuttle additives are being developed to provide overload protection and tested for their application in real cells in cooperation with two industrial partners. The project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of its “LIB 2015” initiative.

Redox shuttle additives are molecules that can be added to the electrolyte and which are oxidised at a defined potential at the positive electrode. The oxidised form of the molecule then moves to the negative electrode, where it is reduced back to its original form before moving again to the positive electrode. Hence, when the oxidation potential of the redox shuttle additive is reached, a process starts which “fixes” the potential of the positive electrode and which prevents the cell voltage from increasing further. The charging current is no longer used for charging the electrodes further but for oxidising (and reducing) the redox shuttle additive. This effect can be used, for example, to protect cells from overloading or as a means for equilibrating cells in series connections during the charging process.

To characterise the new additives and to explain the underlying mechanisms, experimental electrochemical investigations are combined with computer-aided modelling.

// Wirkungsweise eines
Redox-Shuttle-Additives
// How Redox shuttle
additives work



// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens

Der größte Schritt im letzten Jahr war sicherlich die Entwicklung eines Materials, das nicht nur extrem sicher ist, sondern auch Rekordkapazitäten für Akkumulatoren ermöglicht.

Without doubt, the greatest progress made last year was the development of a material that is not only extremely safe but also enables record capacities for accumulators.

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)

// Unsere Kernkompetenzen

Die zunehmende Elektrifizierung des Alltags sowie die zunehmende Zahl nicht netzgebundener Stromverbraucher vom Mobiltelefon über Akkuwerkzeuge bis zum elektrischen Fahrzeugantrieb stellen hohe Anforderungen an die eingesetzten elektrochemischen Stromquellen.

Die kontinuierliche Optimierung von Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC) und Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) sowie die Entwicklung neuer Komponenten und Technologien sind die Themen des Fachgebietes.

Aktuell gehören hierzu:

- > Ein vertieftes Verständnis der elektrochemischen Prozesse in PEFC (z.B. Korrosion)
- > Neue Ansätze zur Aktivitätssteigerung der elektrochemischen Oxidation von Alkoholen
- > Die Minimierung oder Vermeidung von Edelmetallkatalysatoren

Die Arbeiten des Fachgebiets sind gegenwärtig auf die folgenden Themen fokussiert:

- > Korrosionsresistente PEFC-Elektrodenstrukturen
- > Direkt-Alkohol-Brennstoffzellen
- > Nicht-Edelmetallkatalysatoren für die elektrochemische Sauerstoffreduktion

Enge Kooperation gibt es mit den anderen ZSW-Fachgebieten sowie Partnern aus Hochschulen und Industrie.

// Our Main Focus

The increasing use of electric energy in daily life as well as increasing numbers of off-grid electric appliances, ranging from mobile phones and cordless tools to electric vehicles, pose significant challenges to the electrochemical power sources used.

Continual optimisation of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEFC) and Direct Methanol Fuel Cells (DMFC), as well as the development of new components and technologies, form the focus of this department.

Current focuses include:

- > In-depth understanding of the electrochemical processes in PEFC (e.g. corrosion)
- > New approaches to increasing the electrochemical oxidation of alcohols
- > The minimisation or avoidance of noble metal catalysts

The activities of the department currently focus on the following topics:

- > Corrosion-resistant PEFC electrode structures
- > Direct Alcohol Fuel Cells
- > Non-noble metal catalysts for electrochemical oxygen reduction

There is close cooperation with the other ZSW departments as well as with partners from universities and industry.



// Contact

Dr. Ludwig Jörissen

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

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

// Direkt-Alkohol-Brennstoffzellen

Direct Alcohol Fuel Cells

// Direkt-Alkohol-Brennstoffzellen

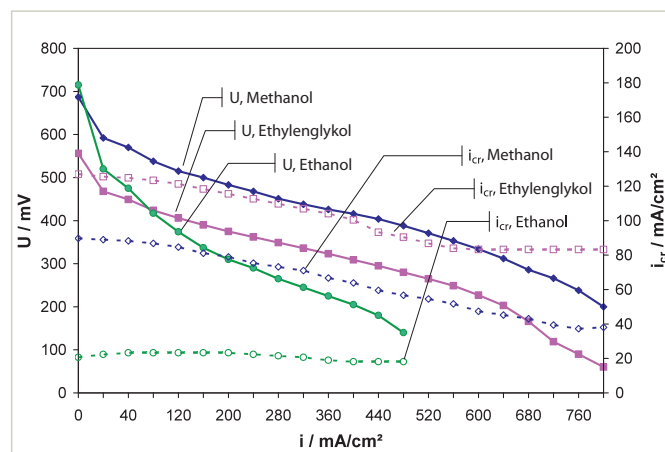
Der Einsatz von Alkoholen als Brennstoff in Polymer-Elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEFC) ist sowohl aus Gründen der Brennstofflogistik als auch der Energiedichte attraktiv. Infolge der komplexen elektrochemischen Vorgänge an der Alkoholelektrode sind die Leistungsdichten alkoholbetriebener Zellen geringer als bei wasserstoffbetriebenen Zellen. Eine Möglichkeit zur Leistungssteigerung von Direkt-Alkohol-Zellen ist die Erhöhung der Betriebstemperatur.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde das Verhalten einer Direkt-Alkohol-Zelle mit den Brennstoffen Methanol, Ethanol und Ethylenglykol untersucht. Die Leistungsdichte der untersuchten Zellen bei einer Zellspannung von 300 mV steigt in der Reihenfolge Ethanol < Ethylenglykol < Methanol. Die mit Methanol und Ethanol betriebenen Zellen weisen ähnliche Leerlaufspannungen auf, die Ethanolzelle zeigt jedoch einen sehr starken Abfall der Zellspannung bei höheren Stromdichten. Erstaunlich ist die geringe Leerlaufspannung der mit Ethylenglykol betriebenen Zelle. Der weitere Verlauf der Strom-Spannungskurve ist annähernd parallel zur methanolbetriebenen Zelle. Eine mögliche Erklärung ist eine starke Wechselwirkung von durch die Elektrolytmembran permiertem Ethylenglykol mit der Kathode. Der mit Hilfe der kathodischen CO_2 -Entwicklung gemessene Alkohol-Durchtritt nimmt in der Reihenfolge Ethanol < Methanol < Ethylenglykol zu.

// Direct Alcohol Fuel Cells

The use of alcohols as a fuel in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEFC) is attractive from a fuel logistic and energy density point of view. The complex electrochemical processes taking place at the alcohol-oxidising electrode cause the power densities of alcohol-fuelled fuel cells to be lower than for hydrogen-powered cells. One option to improve the power of Direct Alcohol Fuel Cells is to increase the operating temperature.

A research project has investigated the behaviour of Direct Alcohol Fuel Cells using methanol, ethanol and ethylene glycol as fuels. The power density of the cells investigated, with a cell voltage of 300 mV, increased in the sequence ethanol < ethylene glycol < methanol. Cells operated with methanol and ethanol displayed similar open-circuit voltages. The voltage of the cell operated on ethanol, however, decreased rapidly with increasing current density. The cell operated with ethylene glycol surprisingly showed a very low open-circuit voltage. However, the further course of its current-voltage curve is almost parallel to the cell operated with methanol. One possible explanation for this is that ethylene glycol permeating through the electrolyte membrane strongly reacts with the cathode catalyst. The cathodic CO_2 evolution indicates increasing alcohol permeation in the sequence ethanol < methanol < ethylene glycol.



// Strom-Spannungskennlinien von Direkt-Alkohol-Brennstoffzellen bei Verwendung verschiedener Brennstoffe

// Current-voltage characteristics of Direct Alcohol Fuel Cells using different fuels

// Dipl.-Chem. Ulrich Storr

Neue Energiekonzepte brauchen neue Wege. Deshalb entwickeln wir neue Membranen und Katalysatoren, die Brennstoffzellen in der Herstellung deutlich günstiger machen.

New energy concepts need new processes. That is why we are developing new membranes and catalysts that make fuel cells considerably cheaper to manufacture.

// Brennstoffzellen Stacks (ECB)

Fuel Cell Stacks (ECB)

// Unsere Kernkompetenzen

Brennstoffzellen erzeugen emissionsfrei Strom und Wärme mit hohem Wirkungsgrad aus speicherbaren Energieträgern wie Wasserstoff, Methanol oder Erdgas und werden bereits heute in vielen Anwendungen erfolgreich eingesetzt. Das Fachgebiet ECB spielt eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung und Optimierung von Niedertemperatur- und Hochtemperatur-Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen (PEMFC).

Die Optimierung erfolgt häufig über die Modellierung und Simulation einzelner Komponenten, Zellen und kompletter Systeme. Auf dieser Basis können die Strukturen und Materialien der Komponenten den Anforderungen angepasst und optimierte Bauteile und Zellen verifiziert werden. Abgerundet wird das Aufgabenspektrum durch die Erarbeitung von effektiven Herstell- und Prüftechniken, die sich für die Serienproduktion von Brennstoffzellen in der Industrie eignen.

// Our Main Focus

Fuel cells generate emission-free electricity and heat with a high efficiency from storable energy sources such as hydrogen, methanol and natural gas and are already successfully used in many applications. The ECB department plays a key role in developing and optimising low- and high-temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC).

The optimisation is frequently achieved by modelling and simulating individual components, cells and complete systems. This makes it possible to adapt the component structures and materials in accordance with needs and to verify optimised components and cells. The range of tasks is rounded off with the development of effective manufacturing and testing techniques suitable for the mass production of fuel cells in industry.

// Contact

Dr. Joachim Scholta

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

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



// Untersuchungsmethoden

Investigation Methods

// Röntgen- und neutronenbasierte Untersuchungsmethoden für PEM-Brennstoffzellen (RuN-PEM)

Ein optimiertes Wassermanagement ist einer der Schlüsselfaktoren für den Betrieb und die Lebensdauer von Niedertemperatur-Brennstoffzellen. Derzeit werden verschiedene Methoden eingesetzt, um Brennstoffzellenmaterialien hinsichtlich eines ausgeglichenen Wasserhaushalts zu bewerten und zu optimieren. In den letzten Jahren haben In-situ-Untersuchungen zunehmend an Bedeutung gewonnen und zu großen Verbesserungen des Brennstoffzellendesigns geführt. Das Verbundprojekt „RuN-PEM“ vereint die Kompetenz von Partnern aus Forschungseinrichtungen und Universitäten, die auf unterschiedlichen Gebieten von der Grundlagenforschung bis zur anwendungsorientierten Entwicklung arbeiten. Finanziert wird das Projekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Verschiedene Diagnosemethoden wie Neutronenradiographie, orts aufgelöste Stromdichtemessung, hochauflösende Synchrotronradiographie und elektrische Impedanzspektroskopie werden eingesetzt als Ausgangspunkt für hilfreiche Einblicke in Brennstoffzellen während des Zellbetriebs.

Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der komplementären Analyse von Transportprozessen im Zellbetrieb und deren Effekten auf Leistungsmerkmale, Alterung und Materialabnutzung. Ergänzend zu den angewandten Methoden werden neue Modellierungsansätze zur Beschreibung poröser Mikrostrukturen für ein grundlegendes Verständnis von Transportwegen in Gasdiffusionsmedien untersucht. Das Projekt Netzwerk wird komplettiert durch Entwicklungen von Rekonstruktionsalgorithmen, wie sie für die dreidimensionale Bildgebung durch Tomographien eingesetzt werden.

// X-ray- and Neutron-based Investigation Methods for PEM Fuel Cells (RuN-PEM)

Optimised water management is one of the key factors affecting the performance and durability of low-temperature fuel cells. A variety of methods are currently employed to evaluate and optimise fuel cell materials to achieve a fine-tuned water balance. In-situ investigations have gained increased importance during recent years and have led to considerable improvements in fuel cell design. The “RuN-PEM” network bundles the expertise of partners from research institutes and universities working in different fields that range from basic research to application-oriented development. The project is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

Various diagnostic methods such as neutron radiography, spatially resolved current density measurements, high-resolution synchrotron radiography and electrical impedance spectroscopy are used as a starting point in providing helpful insights into fuel cells during the cell operation.

The project focuses on the complementary analysis of transport processes in operating fuel cells and their effects on performance characteristics, aging and material degradation. In addition to the applied methods, new modelling approaches to describe porous microstructures are being investigated in order to provide a fundamental understanding of transport pathways in gas diffusion media. The project network is rounded off with development work on reconstruction algorithms, as employed for three-dimensional imaging of tomographic applications.

// Dr. Joachim Scholta

Unsere Arbeit leistet einen entscheidenden Beitrag, um die Herstellung von Brennstoffzellen wirtschaftlicher zu machen und ihren Einsatz zukünftig in unterschiedlichen Anwendungen zu optimieren.

Our work makes a decisive contribution to making the manufacture of fuel cells more economical and thus optimising their future use in different applications.

”



// 1-kW-HT-PEMFC-Stacks

// Entwicklung, Bau, Betrieb und Simulation eines 1-kW-HT-PEMFC-Stacks

Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen erlauben die Umsetzung von Brenngasen aus der Kohlenwasserstoff-Reformierung unter Verwendung einer vereinfachten Gasaufbereitung. Anwendungsfelder sind zum Beispiel stationäre Hausenergieversorgungsanlagen. Die Aktivitäten wurden mit Mitteln aus der Zukunftsoffensive IV des Landes Baden-Württemberg vom Umweltministerium Baden-Württemberg innerhalb des Forschungsprogramms „Herausforderung Brennstoffzelle“ gefördert. Im Rahmen des Projekts wurde ein Hochtemperatur-PEMFC-Stack (HT-PEMFC) mit einer Leistung von 1 Kilowatt simuliert, entwickelt, gebaut und erfolgreich betrieben. Basierend auf Simulationen zur Temperatur- und Strömungsverteilung wurde ein Zelldesign erstellt, welches für den Betrieb mit externer Kühlung geeignet ist. Aufgrund dieser Anordnung ist es möglich, die Brennstoffzelle deutlich kompakter als bisher aufzubauen und verschiedene Kühlmittel einzusetzen.

Mehrere Stack-Varianten mit interner und mit externer Kühlung wurden hergestellt und in Dauertests erprobt. Die sich bei externer Kühlung einstellende Temperaturverteilung im Stack wurde experimentell bestätigt und damit die Einsetzbarkeit des Stacks mit externer Kühlung nachgewiesen.

Weiterhin wurden mehrere Diagnoseverfahren an den Einsatz für HT-PEMFC angepasst und erprobt. Hierzu gehören die ortsauflösende Bestimmung der Stromdichte sowie die Bestimmung des Wechselstromwiderstands. Es wurden umfangreiche Kennfelder unter Variation der Betriebsparameter Temperatur, Gaszusammensetzung, Umsatzgrad und CO-Konzentration vermessen und so eine umfassende Datenbasis zum Einsatz von HT-PEMFC in stationären und portablen Systemen erarbeitet.

// Development, Construction, Operation and Simulation of a 1-kW HT PEMFC-Stack

High-temperature PEM fuel cells utilise simplified gas processing to enable the implementation of fuel gases derived from hydrocarbon reformation. Application areas include stationary, domestic energy supply units. The project was funded by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment as part of the “Challenge Fuel Cell” research programme. Within the project, a high-temperature PEMFC stack (HT-PEMFC) with an output of 1 kW was simulated, developed, built and successfully operated. Based on temperature and flow simulations, a cell design was developed that is suitable for operation with external cooling. This design makes it possible to construct fuel cells that are considerably more compact than previous models and to use different coolants.

Several stacks versions with internal and external cooling were built and subjected to endurance tests. The temperature distribution in the stack when there is external cooling was confirmed experimentally, thus verifying the usability of the stack with external cooling.

In addition, several diagnostic procedures were adapted and tested for use on HT-PEMFC stacks. These include the spatially resolved determination of the current density and the determination of the AC impedance. Diverse characteristic curves were measured by varying operating parameters such as the temperature, gas composition, degree of conversion and CO concentration. This created a comprehensive database for using HT-PEMFC stacks in stationary and portable systems.

// HT-PEMFC-Kurzstacks mit Vorrichtungen zur Messung der Temperatur- bzw. Stromdichteverteilung
// HT-PEMFC short stacks with equipment for measuring the temperature and current density distribution



// Contact

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



// 10-kW-PEMFC-Stacks

// Entwicklung eines 10-kW-PEMFC-Stacks für Reformatbetrieb unter erhöhtem Druck für die netzferne Stromversorgung sowie Hausenergieversorgung mit nicht leitungsgebundenen Energieträgern

Projektziel ist die Entwicklung eines PEMFC-Stacks mit hoher Leistungsfähigkeit und besonderer Eignung für die Verstromung von Reformat mit niedrigem Wasserstoffgehalt, wie aus autothermer Wasserstofferzeugung. Zielgrößen sind Reformat-Nutzungsgrade von 80 % sowie ein Betriebsdruck von bis zu 3 bar. Ein weiteres Entwicklungsziel ist die Kompatibilität des Stack mit industriellen Herstellungsverfahren. Das Projekt wird aus Mitteln der Stiftung Energieforschung Baden-Württemberg gefördert.

Die Entwicklungsarbeiten umfassen Aktivitäten im Bereich der Zelle (Gasverteilerfeld, Dichtungen und Randdesign) sowie der Endplatte mit dem Ziel einer Erhöhung der Druckfestigkeit sowie Leistungsfähigkeit der Zelle unter Druck.

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Versuchsstacks gebaut und getestet. Sie zeigten dabei die gewünschte hohe Leistungsdichte unter den genannten Betriebsbedingungen. Derzeit laufen Arbeiten zur Gewichtsreduktion von Stackkomponenten sowie zum Aufbau des 10-kW-Stacks.

// Development of a 10-kW PEMFC Stack for Reformat Operation under Elevated Pressure for Off-Grid Power Supplies and Domestic Energy Supplies with Non-Pipeline-Bound Fuels

The aim of the project is to develop a high-performing PEMFC stack suitable for generating electricity from reformates with low hydrogen concentrations, such as those obtained, for example, from autothermal hydrogen generation. The intention is to achieve 80 % reformat utilisation and operating pressures of up to 3 bar. A further development aim is to ensure the stack's compatibility with industrial fabrication methods. The project is funded by the Baden-Württemberg Energy Research Foundation.

The development work focuses on areas concerned with the cell (gas distribution field, seals and frame design) and the end plate, with the aim of increasing the pressure resistance and performance capability of the cells under pressure.

Several pilot stacks were built and tested as part of the project. They showed the desired high power density under the aforementioned operating conditions. Work is currently underway to reduce the weight of the stack components and to develop the structure of the 10-kW stack.

// Im Prüfstand
// In the test rig



// Contact

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

// Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)

// Unsere Kernkompetenzen

Zur genauen Charakterisierung und Prüfung von Brennstoffzellen betreibt das Fachgebiet ECS im ZSW über 20 Teststände und damit eines der größten unabhängigen Testzentren der Welt. In unterschiedlichen Verfahren werden Brennstoffzellenstacks, Brennstoffzellensysteme und Systemkomponenten von den Grundlagen bis hin zur Hardware-in-the-Loop getestet und charakterisiert.

Durch die Vollautomatisierung der Teststände werden rund um die Uhr laufende und dadurch kosteneffiziente Leistungsuntersuchungen ebenso ermöglicht wie in kürzester Zeit durchgeführte beschleunigte Lebensdauertests. Das Know-how, die Erkenntnisse und die langjährigen Erfahrungen aus vielen Tests setzen die ECS-Mitarbeiter ein, um Prototypen für die verschiedensten Anwendungsbereiche zu entwickeln, einschließlich Steuerungseinheiten, Sicherheitsbewertungen und Packaging-Studien.

Bisher gebaute Systeme reichen von 1- bis 50-W-Systemen in Kleingeräten und im Modellbau über 1-kW-Schulungssysteme und 4-kW-Hausenergiesysteme bis zu 20-kW-Notversorgungssystemen für Flugzeuge und 50-kW-Busantriebe.

// Our Main Focus

In order to precisely characterise and test fuel cells, the ECS department at ZSW operates more than 20 test rigs, and is thus one of the largest test centres in the world. In different processes, fuel cell stacks, fuel cell systems and system components are tested and characterised, ranging from fundamentals to hardware-in-the-loop simulations.

Full automation of the test rigs enables not just round-the-clock and thus cost-effective performance tests but also accelerated service life tests that can be conducted in very short periods of time. The ECS staff utilise their expertise, knowledge and long-standing experience acquired from numerous tests to develop prototypes for a diverse range of application areas including control units, safety assessments and packaging studies.

Previously built systems range from 1-50-W systems in small devices and model structures through to 1-kW training systems and 4-kW domestic energy systems to 20-kW emergency supply systems for aircraft and 50-kW bus transmissions.



// Contact

Dr. Alexander Kabza

E-Mail: alexander.kabza@zsw-bw.de

Phone: +49(0)731 95 30-832

// Brennstoffzellensystem für Busse

Fuel Cell System for Buses

// Georgetown-University-Busprojekt

Im Rahmen dieses Projektes wird ein methanolbetriebenes Brennstoffzellensystem für den Einbau in einen Hybrid-Bus in den USA entwickelt und aufgebaut.

Das Vorhaben wird innerhalb des „Fuel Cell Transit Bus Programs“ der Georgetown University (Washington DC) durchgeführt und von der U.S. Federal Transit Administration (FTA) finanziert. Im bisherigen Verlauf wurde die Gaserzeugung (Methanol-Kompakt-reformer) in Betrieb gesetzt und erfolgreich getestet. Durch eine Optimierung der Betriebsparameter ist es gelungen, stabile Betriebspunkte zu identifizieren und geeignete Prozeduren zur In- und Außerbetriebnahme des Gaserzeugungssystems zu entwickeln. Außerdem konnte das Brennstoffzellen-Gesamtsystem mit Brennstoffzellen-Stack und Reformer aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen werden.

In der derzeit laufenden Optimierungsphase werden sowohl die System-Betriebsbedingungen als auch einzelne Systemkomponenten optimiert. Um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen, werden auch Schlüsselkomponenten, die sich unzuverlässig zeigten, durch neu entwickelte und robustere Komponenten ersetzt. Die Optimierungsphase ist dann abgeschlossen, wenn unter Realbedingungen ein dynamisches Bus-Fahrprofil abgefahren werden kann. Anschließend wird das System in einen Hybrid-Bus integriert. Diese Arbeiten werden vom Bushersteller selbst und verschiedenen Zulieferfirmen unterstützt.

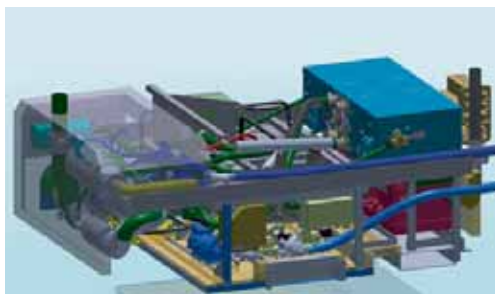
// Georgetown University Bus Project

As part of this project, a methanol-powered fuel cell system is being developed and built for integration in a hybrid bus in the United States.

The project is being carried out as part of the Fuel Cell Transit Bus Program conducted by Georgetown University (Washington DC), which is being funded by the U.S. Federal Transit Administration (FTA). The gas processor (methanol compact reformer) has already been successfully operated and tested. By optimising the operating parameters, it has also been possible to identify stable operating points and develop suitable procedures for starting up and shutting down the gas generator systems. In addition, the entire fuel cell system with the fuel cell stack and reformer has also been successfully assembled and operated.

In the ongoing optimisation phase, both the system operating conditions and individual system components are currently being optimised. In order to achieve the best possible results, key components that prove to be unreliable will also be replaced with newly developed and more robust components. The optimisation phase will be concluded when a dynamic bus driving cycle can be performed under realistic conditions. The system will then be integrated into a hybrid bus. This work is being supported by the bus manufacturer itself and various suppliers.

// CAD-Zeichnung und entsprechendes Brennstoffzellen-System für Busse
// CAD drawing and corresponding fuel cell system for buses



// Dr. Alexander Kabza

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

The fully automated operation of our fuel cell testing facilities enables unsupervised, round-the-clock operation with minimum personnel requirements and correspondingly low costs.

”



// Organisation und Verwaltung

Organisation and Administration

// Unsere Kernkompetenzen

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

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. Behind the scientists, many workshop, IT and administrative staff 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 deal with all the work that goes beyond the research at ZSW and provide diverse interfaces inwards and outwards.



// Zentrale Dienste
// Central Services



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



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



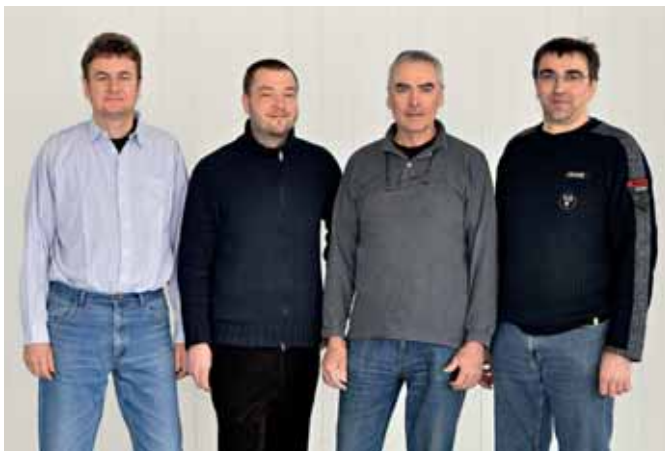
// Service-Team Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien
// Service team for the Electrochemical Energy Technologies Division



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



// Werkstatt Stuttgart
// Stuttgart workshop



// Werkstatt elektronisch Ulm
// Electronics workshop, Ulm



// Werkstatt mechanisch Ulm
// Mechanics workshop, Ulm



// Bauleitung Ulm
// Construction Management, Ulm



// IT Stuttgart
// IT Stuttgart



// Öffentlichkeitsarbeit
Public Relations



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

Informationsmaterial

// Aktuelles

// Pressekontakt

// Presseinformationen

// Informationsmaterial

// Veröffentlichungen

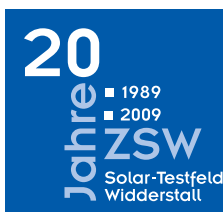
// Veranstaltungen

// Vorlesungen



Die Zukunft erneuerbarer Energien lebt von der Akzeptanz der Bevölkerung, dem Engagement der Industrie und der Förderung durch die Politik. Auch 2009 wurden deshalb viele Forschungsergebnisse auf unterschiedlichen Plattformen veröffentlicht. Unser Rückblick gibt Ihnen einen Einblick.

The future of renewable energy sources resides in public acceptance, the commitment of the industry and political support. For this reason, 2009 again saw the publication of many research results on various platforms. Our review provides you with an insight into these activities.



// 20 Jahre Solar-Testfeld

Höhepunkt der Öffentlichkeitsarbeit war das große Fest „20 Jahre Solar-Testfeld ZSW und 800 Jahre Weiler Widderstall“ am 12.7.2009 auf dem Solar-Testfeld in Widderstall, das mit Bürgern und Gästen aus nah und fern und den örtlichen Vereinen von Merklingen gefeiert wurde. Im gut besuchten Festzelt wurde nach einem Festgottesdienst ein abwechslungsreiches Programm mit einem Theaterstück, musikalischer Unterhaltung und einem bunten Kinderprogramm geboten.

// 20 Years of the Solar Testing Facility

The highlight of the public relations work was the big celebration of “20 Years of the ZSW Solar Testing Facility and 800 Years of Weiler Widderstall” on 12/07/2009 at the solar testing facility in Widderstall, Germany, which was attended by local citizens and guests from near and far, as well as by the local associations from Merklingen. After a festive church service, a diverse programme was offered in a packed marquee, including a play, musical entertainment and a colourful range of children’s activities.



Gleichzeitig wurde an diesem Tag das europaweit größte Testgelände für Solarmodule um einen neuen Prüfstand erweitert. Der Solar-Tracker für beschleunigte Alterungstests wurde von der Bundesministerin für Bildung und Forschung, Frau Prof. Dr. Annette Schavan, in Betrieb genommen.

On the same day, Europe's largest test facility for solar modules was simultaneously enlarged to include a new test rig. The solar tracker for accelerated aging tests was activated by the German Federal Minister of Education and Research, Prof. Dr. Annette Schavan.



// Erneuerbare Energien im Interesse der Öffentlichkeit

Im Geschäftsjahr 2009 präsentierte sich das Institut mit seinen Forschungsschwerpunkten auf namhaften überregionalen Fachmessen mit innovativen Forschungsergebnissen und Produktentwicklungen. Mit der Beteiligung an lokalen, regionalen und internationalen Informationsveranstaltungen erfüllt das ZSW den Satzungsauftrag, die Öffentlichkeit über die erneuerbaren Energien zu informieren.

// Renewable Energy Sources in the Public Interest

In 2009, the institute presented itself and its key research areas at renowned transregional trade fairs, with innovative research results and product developments. By participating in local, regional and international information events, ZSW fulfils its statutory mandate to inform the public about renewable energy sources.



// Besuch von Wirtschaftsminister Ernst Pfitzer am ZSW in Stuttgart (24.6.2009)
 // Ernst Pfitzer, Minister of Economics of Baden-Württemberg,
 visits ZSW Stuttgart (24/06/2009)



// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens im Interview mit dem FAZ-Wissenschafts-
 journalisten Dr. Manfred Lindinger auf dem ZSW-Messestand der ACHEMA
 // Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens talks to FAZ scientific journalist
 Dr. Manfred Lindinger at the ZSW booth at ACHEMA

Dabei sind nachfolgende Ausstellungen zu nennen:

Neujahrsempfang der Landesvertretung BW, Brüssel	20.1.2009
5th Thin-Film User Forum, Würzburg	26.–28.1.2009
CEP – Clean Energy Power, Stuttgart	29.–31.1.2009
Design und Elektronik, München	19.2.2009
Hannover Messe Industrie	21.–25.4.2009
ACHEMA, Frankfurt/Main	11.–15.5.2009
Nobelpreisträgertagung, Lindau	3.7.2009
20 Jahre Solar-Testfeld Widderstall, Leistungsschau	12.7.2009
Clean Tech Media Award, Berlin	10.9.2009
Branchentag Photovoltaik, Stuttgart	24.11.2009
MRS Fall Meeting 2009, Boston, USA	30.11.–4.12.2009

Das Besucherinteresse ist an allen drei ZSW-Standorten nach wie vor sehr hoch. Repräsentanten aus Industrie und Politik, Vertreter der Kommunen und Länder, der Stadtwerke sowie Schulklassen, Vereine und Verbände informieren sich vor Ort über neue Forschungs- und Entwicklungsergebnisse auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien. Das ZSW erreicht damit im Land und darüber hinaus ein breites Spektrum der Öffentlichkeit.

// ACHEMA 2009 in Frankfurt, 11.–15.5.2009

Das ZSW informierte auf der ACHEMA in Frankfurt, der größten Chiemesse der Welt, in der Halle „Forschung und Innovation“ über neue Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren sowie das gesamte Spektrum der Batterieentwicklung.

ZSW participated in the following exhibitions in 2009:

New Year's Reception of the Representation of the Federal State of Baden-Württemberg, Brussels	20/01/2009
5th Thin-Film User Forum, Würzburg	26–28/01/2009
CEP – Clean Energy Power, Stuttgart	29–31/01/2009
Design und Elektronik, Munich	19/02/2009
Hanover Industrial Trade Fair	21–25/04/2009
ACHEMA, Frankfurt am Main	11–15/05/2009
Nobel Laureate Meeting, Lindau	03/07/2009
20 Years of the Solar Testing Facility Widderstall, exhibition	12/07/2009
Clean Tech Media Award, Berlin	10/09/2009
Branchentag Photovoltaik, Stuttgart	24/11/2009
MRS Fall Meeting 2009, Boston, USA	30/11–04/12/2009

On the whole, the general level of interest shown by visitors to all three sites remains very high. Representatives from industry and politics, municipalities and states, public utility companies and school classes, clubs and associations come to these sites to learn about new research and development results in the field of renewable energy sources. In this way, ZSW reaches a broad spectrum of the public within Baden-Württemberg and beyond.

// ACHEMA 2009 in Frankfurt 11–15/05/2009

At ACHEMA in Frankfurt, the world's largest chemistry trade fair, ZSW provided information on new functional materials for batteries, supercapacitors and the whole field of battery development in the Research and Innovation Hall.

// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations



// Medienarbeit

Die Pressearbeit des ZSW konnte in Zusammenarbeit mit externen Partnern erfolgreich weiterentwickelt werden. Insgesamt wurden über 450 Presseergebnisse erzielt.

Die beste Resonanz erzielten folgende Forschungsthemen:

- > Ulmer Gipfel zum Auto der Zukunft mit Bundesministerin Prof. Dr. Annette Schavan (März)
- > CIS-Europarekord mit 19,6 % (Mai)
- > Bessere Alterungstests mit Solar-Tracker Widderstall (Juli)
- > Helmholtz-Lab „Elektrochemische Grundlagen der Energiespeicherung“ für Ulm – ZSW Ulm als einer von drei Partnern (August)
- > ZSW entwickelt flexibles Dünnschicht-Solarmodul auf Baustahlfolie (Oktober)

// Media Relations

ZSW's press work was further professionalised by cooperating with external partners. Over 450 press results were realised in total.

The greatest response was generated by the following research topics:

- > Ulm Summit on the Car of the Future with Federal Minister Prof. Dr. Annette Schavan (March)
- > European CIS record of 19.6 % (May)
- > Improved aging tests with Widderstall solar tracker (July)
- > Helmholtz lab "Electrochemical basics of energy storage" for Ulm – ZSW Ulm as one of three partners (August)
- > ZSW develops flexible thin-film solar module on steel film (October)



// Neue Imagebroschüre

Eine neue Imagebroschüre gibt einen Überblick über Forschungsthemen und Ziele des ZSW. Die Broschüre ist als Ergänzung zu den vorhandenen Druckerzeugnissen wie Jahresbericht und Fachbroschüren konzipiert.

Wir senden Ihnen gerne ein Exemplar zu: info@zsw-bw.de

// New Image Brochure

A new image brochure for ZSW was developed and delivered at the end of October. It is intended to spark curiosity about ZSW as a renowned research institute for renewable energy sources. The brochure is conceived to complement existing printed material such as the annual report and the specialist brochures.

We would be happy to send you a copy: info@zsw-bw.de





// Dokumentation
Dokumentation



// Haushalt

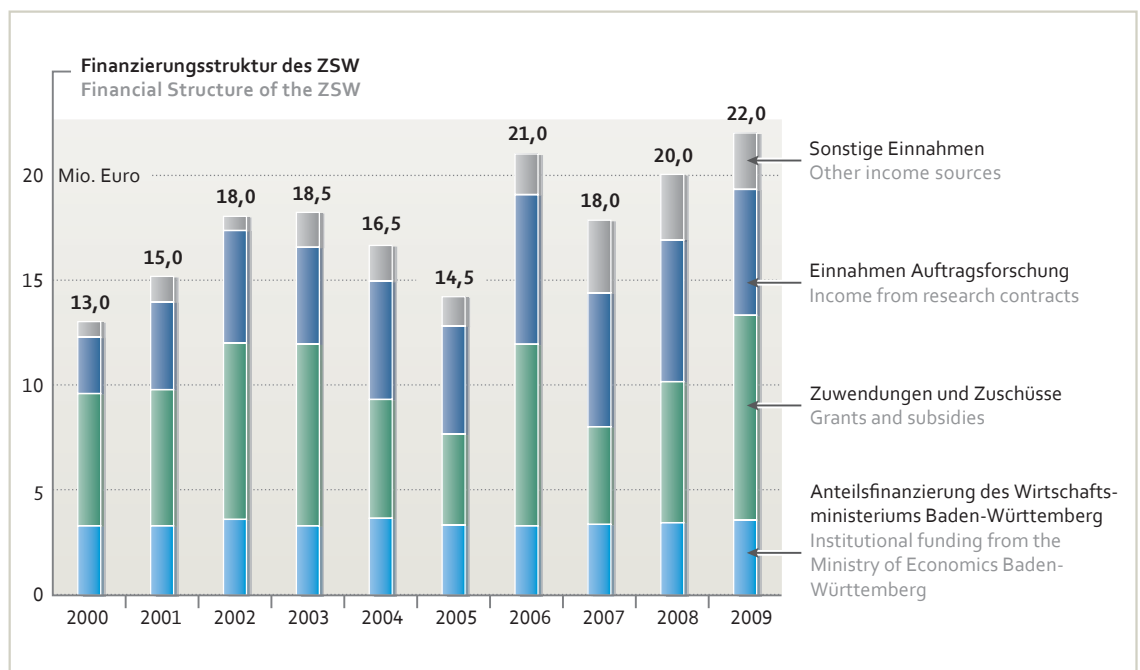
Das Einnahmenvolumen betrug im abgelaufenen Jahr 22,0 Mio. € und lag damit um 10 % über dem Wert des Vorjahres. Die Erträge aus der Auftragsforschung erreichten mit 6,0 Mio. € in etwa das hohe Niveau der Vorjahre. Zugleich stieg der Anteil der öffentlichen Zuwendungen – vor allem durch Investitionsprojekte – deutlich an.

Die erfolgreiche Akquisition des vergangenen Jahres führte in allen Geschäftsbereichen zu einer guten Auslastung der Forschungskapazität und, bedingt durch eine gleichzeitig rationellere Bewirtschaftung, zu einer weiter verbesserten Kostendeckung. Der nahezu unverändert gebliebene Beitrag aus der Anteilsfinanzierung des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg (3,6 Mio. € in 2009) schränkt die notwendigen Freiräume für eigene Vorlauftorschung, den Aufbau neuer Themen und langfristig forschungsbezogene Investitionen nicht unwesentlich ein, weil ein erheblicher Anteil zur Kofinanzierung öffentlicher Zuwendungsprojekte eingesetzt werden muss. Aus diesem Grund steht die Einwerbung kostendeckender Drittmittel unverändert im Fokus.

// Budget

In the past year, the income volume was €22.0 million, which was thus around 10 % higher than in the previous year. The revenues achieved from research contracts achieved €6.0 million, roughly the same level as last year. At the same time the proportion of public subsidies increased considerably, partly as a result of investment projects.

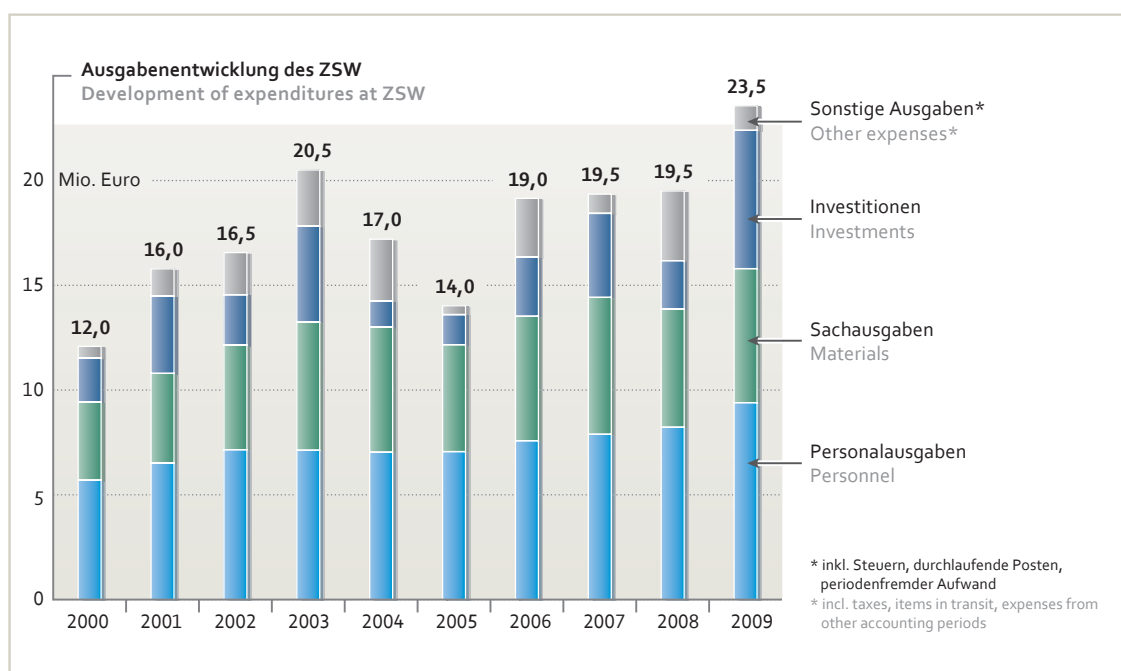
Successful acquisition in the past year led to good utilisation of research capacity in all departments and (due to the more rational management which took place at the same time) to better cost recovery. The almost unchanged funding contribution from the basis funding (€3.6 million in 2009) substantially limits the necessary free capacity for independent preliminary research, the development of new topics and long-term, research-related investment because a considerable portion has to be used for co-funding publicly subsidised projects. For this reason, there is still a focus on procuring cost-covering, third party funds.



// Haushaltsentwicklung Budget Development

Die Gesamtausgaben beliefen sich auf 23,5 Mio. € und überschritten aufgrund von Periodenverschiebungen die Einnahmen um 1,5 Mio. €. Diese Verschiebungen der Zahlungsflüsse haben jedoch keinen Einfluss auf das Ergebnis. Die Personalausgaben stiegen aufgrund der projektbedingten Ausweitung der Kapazität an, konnten aber unter dem Planansatz gehalten werden.

The total expenditure amounts to €23.5 million and, due to periodic lags, exceeds revenues by €1.5 million. This lag in the payment flows does not, however, have any effect on the result. Personnel expenditure rose owing to the project-related increase of capacities, but was successfully kept below the planned level.





// Personalentwicklung

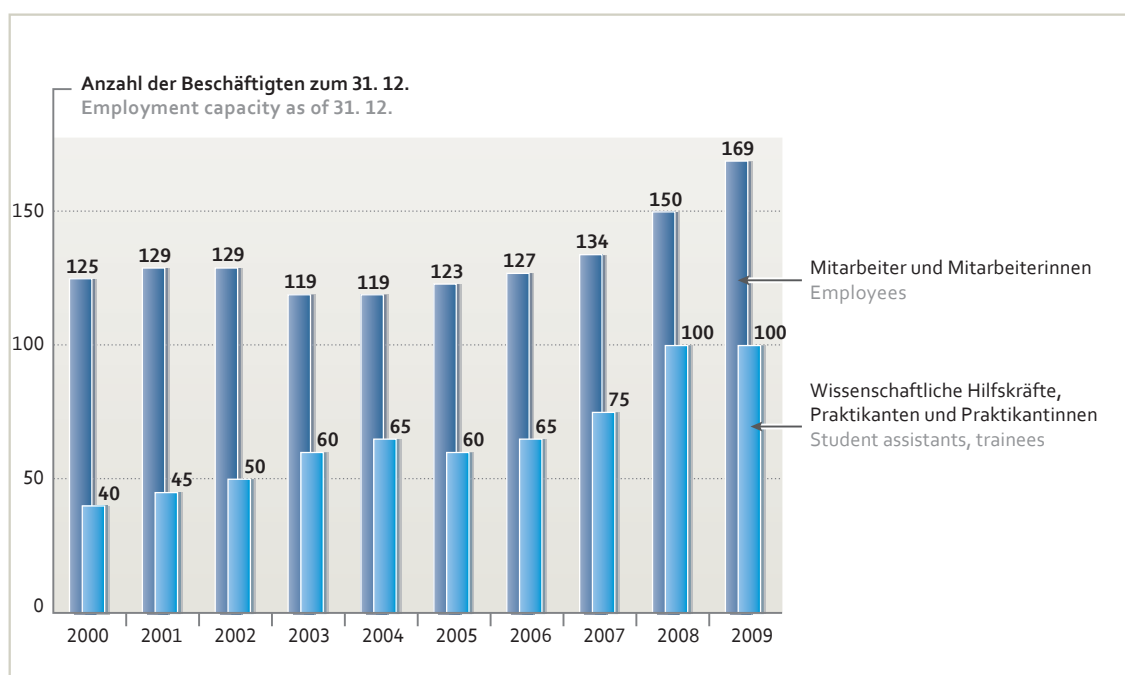
Wie in der mittelfristigen Finanzplanung und dem Wirtschaftsplan beabsichtigt, hat sich der Wachstumstrend beim Personal 2009 weiter fortgesetzt. Die Mitarbeiterkapazität erreichte zum 31. Dezember 154,5 Vollzeitstellen und damit den höchsten Wert seit Bestehen des Instituts. Dies entspricht 169 Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen. Mit einem Anteil von 83 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist nach wie vor eine hohe Produktivität gegeben.

Die Quote der unbefristeten Arbeitsverträge ist 2009 gegenüber dem Vorjahr leicht gestiegen und liegt jetzt bei 62 % aller Beschäftigten. Im wissenschaftlich-technischen Bereich ist der Anteil der unbefristeten Arbeitsverträge mit 40 % weiterhin relativ hoch.

// Staff Development

In accord with our medium-term financial and economic plan, staff numbers continued to increase in 2009. By 31 December, the staff capacity reached 154.5 full-time equivalent positions, which represents the highest capacity since the institute's founding. This corresponds to 169 employees. With 83 % of all staff active in the scientific-technical area, it remains the case that a high level of productivity is guaranteed.

In 2009, the share of permanent employment contracts rose slightly as compared to the previous year and is now at 62 % of all employees. In the scientific-technical area, the share of permanent employment contracts is still relatively high, at 40 %.



// Personalentwicklung Staff Development

Im Berichtsjahr arbeiteten am Institut 18 Doktoranden an ihrer Dissertation. Drei Auszubildende werden in einer dreieinhalbjährigen Ausbildung in der mechanischen Werkstatt Stuttgart zum Industriemechaniker ausgebildet. Eine Auszubildende mit dem Berufsbild „Kaufrau für Bürokommunikation“ befindet sich im zweiten Ausbildungsjahr. Das Ausbildungskonzept wurde in Kooperation mit der Universität Stuttgart zusammengestellt. Erstmals wird im Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien eine Chemielaborantin ausgebildet. Über die nach dem Tarifvertrag der Länder beschäftigten Mitarbeiter hinaus sind am ZSW rund 100 Studenten und Praktikanten tätig.

Von besonderer Bedeutung für das Institut ist 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 sowie Dissertationen. Im Berichtszeitraum waren acht Mitarbeiter aus allen Fachgebieten in der Lehre tätig.

In the year under review, 18 PhD students worked on their theses at the institute. In a three-and-a-half-year course, three apprentices are also training to become industrial mechanics in the mechanical workshop in Stuttgart. Another trainee is in her second year of training to become an office communications clerk. The training concept was devised in cooperation with the University of Stuttgart. For the first time in the Electrochemical Energy Technologies Division, a chemical laboratory assistant is being trained. About 100 students and trainees are employed at ZSW in addition to the staff employed under the collective labour agreements of the federal states.

The institute places particular importance on networking with universities and being actively involved in academic training through providing lectures, seminars and practical training as well as supervising final theses and dissertations. During the period under review, eight employees from all specialist areas were involved in teaching.



// Veröffentlichungen Publications

// Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften

// Publications in Books and Journals

- / Abou-Ras D. (ETH Zürich), Kistorz G. (ETH Zürich), Hariskos D., Menner R., Powalla M., Schorr S. (FU Berlin), Tiwari A.N. (Univ. Loughborough); **Structural and chemical analyses of sputtered In_xS_y buffer layers in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ thin film solar cells**; Thin Solid Films 517 (2009) 2792-2798
- / Akhtar N. (Univ. of Lahore), Qureshi A. (Univ. of Lahore), Scholta J., Hartnig C., Messerschmidt M., Lehnert W. (FZJ); **Investigation of water droplet kinetics and optimization of channel geometry for PEM fuel cell cathodes**; Energy 34 (7), pp. 3104-3111
- / Caballero R. (HMI), Kaufmann C.A. (HMI), Eisenbarth T. (HMI), Cancela M. (HMI), Hesse R. (HMI), Unold T. (HMI), Eicke A., Klenk R. (HMI), Schock H.-W. (HMI); **The influence of Na on low temperature growth of CIGS thin film solar cells on polyimide substrates**; Thin Solid Films 517 (2009), 2187-2190
- / Fontané X. (Univ. de Barcelona), Izquierdo-Roca V. (Univ. de Barcelona), Calvo-Barrio L. (Univ. de Barcelona), Álvarez-García J. (CRIC), Pérez-Rodríguez A. (IREC), Witte W.; **In-depth resolved Raman scattering analysis of secondary phases in Cu-poor CuInSe_2 based thin films**; Applied Physics Letters 95 (2009) 121907-1 - 121907-3
- / Fontané X. (Univ. de Barcelona), Izquierdo-Roca V. (Univ. de Barcelona), Calvo-Barrio L. (Univ. de Barcelona), Pérez-Rodríguez A. (IREC), Morante J. R. (IREC), Guettler D. (EMPA), Eicke A., Tiwari A. (EMPA); **Investigation of compositional inhomogeneities in complex polycrystalline $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ layers for solar cells**; Applied Physics Letters 95 (2009) 261912-1 - 261912-3
- / Friedlmeier T., Witte W., Hempel W., Menner R.; **Characterization and monitoring technologies for CIGS**; Photovoltaics International 5 (2009) 112-120
- / Hariskos D., Fuchs B., Menner R., Naghavi N. (IRDEP), Hubert C. (IRDEP), Lincot D. (IRDEP), Powalla M.; **The $\text{Zn}(\text{S},\text{O},\text{OH})/\text{ZnMgO}$ buffer in thin film $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se},\text{S})_2$ -based solar cells, Part 2: Magnetron sputtering of the ZnMgO buffer layer for in-line co-evaporated $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells**; Progress in Photovoltaics, Res. Appl. 17 (2009), 479-488
- / Hartnig C., Manke I. (HZB), Kuhn R., Kleinau S., Goebbels J. (BAM), Banhart J. (HZB); **High-resolution in-plane investigation of the water evolution and transport in PEM fuel cells**; 2009 Journal of Power Sources 188 (2), pp. 468-474
- / Hartnig C., Manke I. (HZB), Schloesser J. (HZB), Krüger P., Kuhn R., Riesemeier H. (BAM), Wippermann K. (FZJ), Banhart J. (HZB); **High resolution synchrotron X-ray investigation of carbon dioxide evolution in operating direct methanol fuel cells**; 2009 Electrochemistry Communications 11 (8), pp. 1559-1562
- / Herb F., Frank A. (Voith), Nitsche C. (Mercedes Benz Techn.), Jossen A.; **Optimierung der Regelung zwischen Brennstoffzelle und Batterie im Bezug auf Komponentenalterung**; at Automatisierungstechnik 57 (2009), 1, Seite 40-47
- / Hubert C. (IRDEP), Naghavi N. (IRDEP), Roussel O. (IRDEP), Etcheberry A. (IREM), Hariskos D., Menner R., Powalla M., Kerrec O. (IRDEP), Lincot D. (IRDEP); **The $\text{Zn}(\text{S},\text{O},\text{OH})/\text{ZnMgO}$ buffer in thin film $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S},\text{Se})_2$ -based solar cells, Part 1: Fast chemical bath deposition of $\text{Zn}(\text{S},\text{O},\text{OH})$ buffer layers for industrial application on co-evaporated $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ and electrodeposited $\text{CuIn}(\text{S},\text{Se})_2$ solar cells**; Progress in Photovoltaics, Res. Appl. 17 (2009), 470-478
- / Jörissen L.; **Residential energy supply: Fuel cells**; in: Juergen Garche, Chris Dyer, Patrick Moseley, Zempachi Ogumi, David Rand and Bruno Scrosati, editors, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Vol 2, Amsterdam: Elsevier; 2009, pp. 108-123
- / Jörissen L.; **Bifunctional oxygen electrodes**; in: Juergen Garche, Chris Dyer, Patrick Moseley, Zempachi Ogumi, David Rand and Bruno Scrosati, editors, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Vol 2, Amsterdam: Elsevier; 2009, pp. 356-371
- / Jörissen L., Frey H.; **Energy storage**; in: Juergen Garche, Chris Dyer, Patrick Moseley, Zempachi Ogumi, David Rand and Bruno Scrosati, editors, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Vol 2, Amsterdam: Elsevier; 2009, pp. 215-231
- / Jörissen L., Gogel V.; **Direct methanol overview**; in: Juergen Garche, Chris Dyer, Patrick Moseley, Zempachi Ogumi, David Rand and Bruno Scrosati, editors, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Vol 2, Amsterdam: Elsevier; 2009, pp. 370-380
- / Jossen A.; **Dynamic of batteries**; Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Elsevier, 28 Oct. 2009
- / Kelm T., Staiß F.; **Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg – Erste Abschätzung**; Broschüre im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg und des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, Juli 2009
- / Kelm T., Staiß F.; **Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg**; Broschüre im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg und des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart, Dezember 2009
- / Kniese R., Powalla M., Rau U. (IPV-FZJ); **Evaluation of electron beam induced current profiles of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells with different Ga-contents**; Thin Solid Films 517 (2009) 2357-2359
- / Koppatz St. (Vienna Univ. of Techn.), Pfeifer Ch. (Vienna Univ. of Techn.), Rauch R. (Vienna Univ. of Techn.), Hofbauer H. (Vienna Univ. of Techn.), Marquard-Moellenstedt T., Specht M.; **H_2 -rich product gas by steam gasification of biomass with in-situ CO_2 -absorption in a dual fluidised bed system of 8 MW fuel input**; Fuel Processing Technology, Vol. 90, Issues 7-8, July-Aug. 2009, pp. 914-921 (2009)
- / Linkohr C., Musiol F., Ottmüller M., Zimmer U., Böhme D. (BMU), Dürrschmidt W. (BMU), van Mark M. (BMU); **Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Juni 2009

- / Linkohr C., Musiol F., Ottmüller M., Zimmer U., Memmler M. (UBA), Mohrbach E. (UBA), Moritz S. (UBA), Schneider S. (UBA), Böhme D. (BMU), Dürrschmidt W. (BMU); **Erneuerbare Energien in Deutschland 1990 bis 2007**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), November 2009
- / Manke I. (HZB), Hartnig Ch., Kardjilov N. (HZB), Hilger A. (HZB), Lange A. (BAM), Kupsch A. (BAM), Banhart J. (HZB); **Wasserverteilung in PEM-Brennstoffzellen – In-situ-Untersuchungen mit Neutronenradiografie und -tomografie**; MP Materials Testing, 4/2009, Vol 51
- / Marquard-Möllenstedt T., Stürmer B., Zuberbühler U., Specht M.; **Hydrogen and methane for fuel cells via absorption-enhanced thermochemical conversion of biomass**; Encyclopedia of Electrochemical Power Sources 2009, Elsevier Science & Technology, 2009, pp. 249-258
- / Moçotéguy Ph. (EIFER), Ludwig B. (EIFER), Scholta J., Barrera R. (Edison), Ginocchio S. (Univ. Montpellier II); **Long term testing in continous mode of HT-PEMFC-based H_3PO_4 /PBI Celtec-P MEAs for μ -CHP applications**; 2009 Fuel Cells 9 (4), pp. 325-348
- / Mohring H.-D., Powalla M.; **Status – PV Dünnschicht**; e&i – elektrotechnik und informationstechnik (praxis+wissen) 9 (2009) a24 - a25
- / Musiol F., Schmidt M., Dürrschmidt W. (BMU), Büsgen U. (BMU); **Strom aus Erneuerbaren Energien: Zukunftsinvestitionen mit Perspektiven – EEG-Erfahrungsbericht 2007 und EEG 2009 im Überblick**; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hg.), Juni 2009
- / Naghavi N. (IRDEP), Hubert C. (IRDEP), Etcheberry A. (Univ. Versailles), Bermudez V. (IRDEP), Hariskos D., Powalla M., Lincot D. (IRDEP); **Compositional engineering of chemical bath deposited (Zn,Cd)S buffer layers for electrodeposited $Cu(In,Se)_2$ and coevaporated $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells**; Progress in Photovoltaics, Res Appl. 17 (2009) 1-9
- / Obeidi Sh. (Univ. Münster), Würz R., Frankenfeld M., Eicke A., Stolwijk N.A. (Univ. Münster); **Diffusion of iron into solar-grade CIGS layers from natural and radioactive front-side sources**; Thin Solid Films 517 (2009) 2205-2208
- / Pawlik J. (Viessmann), Chmielewski N. (Viessmann), Scholta J., Lehnert W. (FZJ); **Analysis and optimization of the cell design of a PEMFC-stack**; ECS Transactions 17 (1), 305 (2009)
- / Pistor P. (HMI), Caballero R. (HMI), Hariskos D., Izquierdo-Roca V. (Univ. de Barcelona), Wächter R. (WS), Schorr S. (HMI), Klenk R. (HMI); **Quality and stability of compound indium sulphide as source material for buffer layers in $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells**; Solar Energy Materials & Solar Cells 93 (2009) 148-152
- / Powalla M.; **Thin-film solar cells conquer the market**; InterPV 5 (2009) 22-27
- / Powalla M.; **Dünnschicht-Solarzellen erobern den Markt**; et - Energiewirtschaftliche Tagesfragen 1/2 (2009) 106-108
- / Powalla M.; **Perspektiven der Dünnschichttechnik**; Elektropraktiker 5 (2009) 395-398
- / Powalla M.; **Dünnschicht-Solarzellen erobern den Markt**; Erneuerbare Energien – Jobmotor für Erfolg und Karriere – Technologien, Firmen, Kontakte. Wolf D. Franke (eds.) F.A.Z. -Institut für Management-, Markt- und Medieninformationen GmbH (2009) pp. 182-188
- / Powalla M., Voorwinden G. (WERES), Hariskos D., Jackson P., Kniese R.; **Highly efficient CIS solar cells and modules made by the co-evaporation process**; Thin Solid Films 517 (2009) 2111-2114
- / Scholta J., Kuhn R., Wazlawik S. (MS2), Jörissen L.; **Startup-procedures for HT-PEMFC stack**; ECS Transactions 17 (1), 325 (2009)
- / Scholta J., Messerschmidt M., Jörissen L., Hartnig Ch.; **Externally cooled high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stack**; Journal of Power Sources 190 (2009) 83-85
- / Spiering S., Bürkert L., Hariskos D., Powalla M., Dimmler B. (WS), Giesen C. (AIXTRON), Heuken M. (AIXTRON); **MOCVD indium sulphide for application as a buffer layer in CIGS solar cells**; Thin Solid Films 517 (2009) 2328-2331
- / Vogel-Sperl A., Langniss O. (Fichtner), Diekmann J. (DIW), Braun F. (DIW), Hartmann C. (Univ. Flensburg); **Erneuerbare Energien – Ein Bundesländer-vergleich**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen 59 (2009), 3, S. 8-12
- / Würz R., Eicke A., Frankenfeld M., Kessler F., Powalla M., Rogin P. (INM), Yazdani-Assl O. (INM); **CIGS thin-film solar cells on steel substrates**; Thin Solid Films 517 (2009) 2415-2418

// Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

// Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

- / Abou-Ras D. (HZB), Kaufmann C.A. (HZB), Lauermaier I. (HZB), Mönig H. (HZB), Schöpke A. (HZB), Stephan C. (HZB), Schorr S. (FU Berlin), Eicke A., Döbeli M. (PSI), Gade B. (Thermo Fisher), Dijkstra H. (Thermo Fisher), Nunney T. (Thermo Fisher), Hinrichs J. (Thermo Fisher), Hoffmann V. (IFW), Klemm D. (IFW), Efimova V. (IFW), Bergmaier A. (UniBW), Dollinger G. (UniBW); **Elemental distribution profiles across $Cu(In,Ga)Se_2$ solar-cells absorbers acquired by various techniques**; MRS 2009 Spring Meeting, San Francisco, 13-17 April 2009
- / Ahlswede E.; **Organic photovoltaics: Tandem solar cells**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Axmann P., Arnold G., Memm M., Fleischhammer M., Weirather W., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Phosphoolivine als Kathodenmaterialien – Struktur – Morphologie - Elektrochemie**; DFG-Projektinitiative, Reissensburg, 9.-11.3.2009
- / Bauer A., Colmann A. (LTI), Klein M.F.G. (LTI), Lemmer U. (LTI), Hanisch J., Ahlswede E., Sanyol M. (MPF), Munuera C. (MPF), Barrena E. (MPF), Schmidt-Hansberg B. (Univ. Karlsruhe), Schabel W. (Univ. Karlsruhe), Pasker F. (Kekulé Inst.), Höger S. (Kekulé Inst.); **Towards transparent and multi-junction polymer solar cells with improved optoelectronic properties (TRAPOS)**; DFG-Jahrestreffen, Schwerpunktprogramm 1355, Elementarprozesse der Organischen Photovoltaik, Wuppertal, 13-14 May 2009
- / Bett A. (FhG-ISE), Burger B. (FhG-ISE), Jaus J. (FhG-ISE), Vetter M. (FhG-ISE), Fellmeth T. (FhG-ISE), Mohring H.-D., Gombert A. (Concentrix), Lerchenmüller H. (Concentrix); **Konzentrierende Photovoltaik (CPV) für Länder mit hoher direkter Einstrahlung**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Braun M. (IWES), Büdenbender K. (IWES), Magnor D. (RWTH), Jossen A.; **Photovoltaic self-consumption in Germany using lithium-ion storage to increase self-consumed photovoltaic energy**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Brellachs J., Marquard-Möllenstedt T., Specht M., Zuberbühler U., Koppatz S. (Vienna Univ. of Techn.), Pfeifer C. (Vienna Univ. of Techn.), Hofbauer H. (Vienna Univ. of Techn.); **Stoichiometry adjustment of biomass steam gasification in DFB process by in-situ CO_2 absorption**; International Conference on Poly-Generation Strategies, Wien, 1-4 Sept. 2009
- / Brusdeylins C.; **Research and development in photovoltaics at ZSW (Poster E), Research in systems technology at ZSW (Poster G)**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Caballero R. (HZB), Kaufmann C.A. (HZB), Eisenbarth T. (HZB), Eicke A., Unold T. (HZB), Klenk R. (HZB), Schock H.-W. (HZB); **Enhanced efficiency of CIGS thin film solar cells on polyimide substrates**; MRS 2009 Spring Meeting, San Francisco, 13-17 April 2009
- / Caballero R. (HZB), Kaufmann C.A. (HZB), Klenk R. (HZB), Schock H.-W. (HZB), Zajac K. (HTS), Brunner S. (HTS), John R. (HTS), Rahm A. (Solarion), Zachmann A. (Solarion), Scheit C. (Solarion), Braun A. (Solarion), Otte K. (Solarion), Wagner M., Würz R., Kessler F., Schüle P. (DLR); **The German joint project "Flexible CIGSe Thin Film Solar Cells for Space Applications"**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009

//Veröffentlichungen Publications



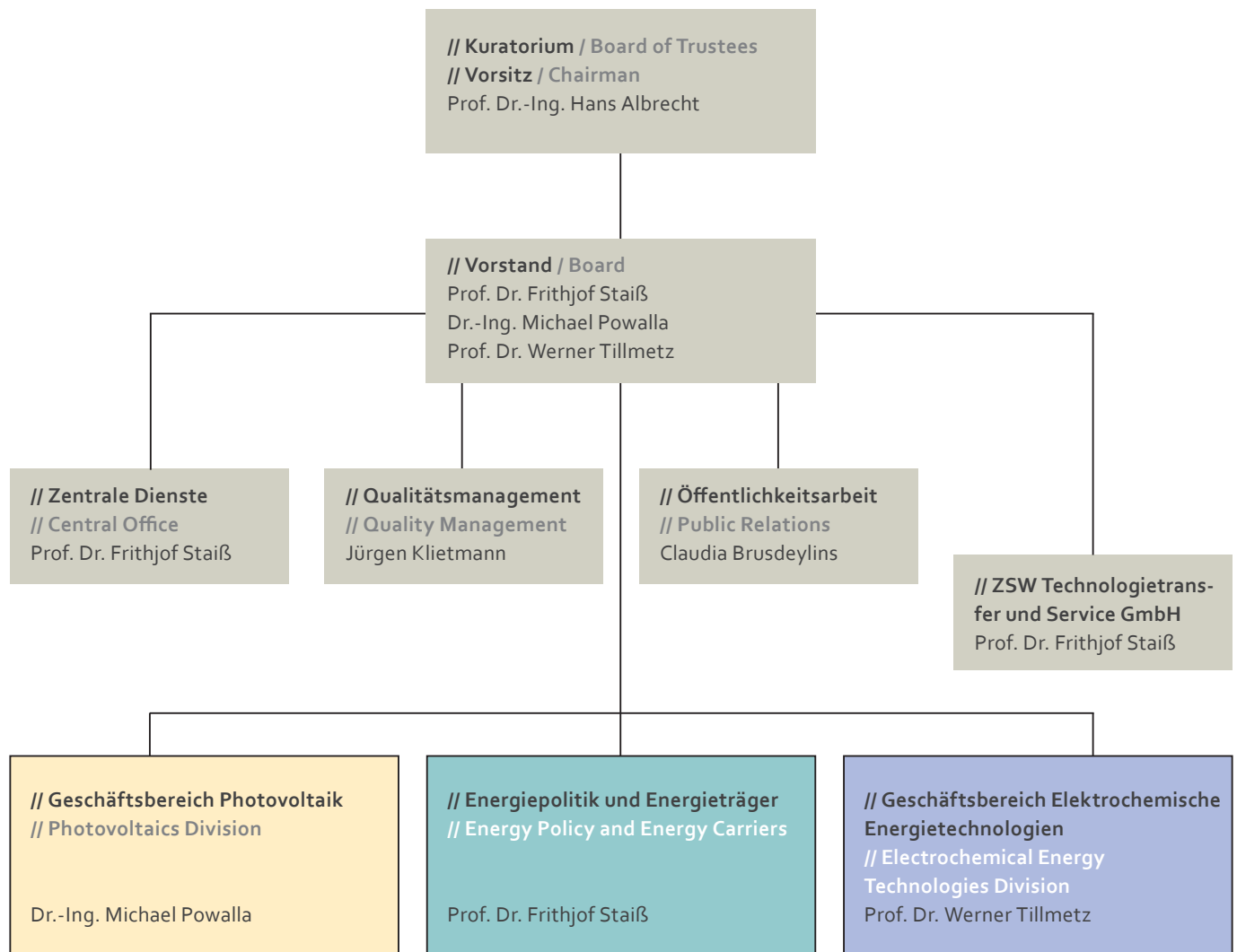
- / Carlsson A., Jörissen L., Tillmetz W.; **Degradation of PFSA Polymer Membranes**; 216th Meeting of The Electrochemical Society, Vienna, 4-9 Oct. 2009
- / Eicke A., Würz R., Kessler F.; **Study of Fe diffusion into Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) thin-film solar cells on steel substrates by SIMS and SNMS**; ECASIA '09, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, Antalya, 18-23 Oct. 2009
- / Eisenbarth T. (HZB), Unold T. (HZB), Caballero R. (HZB), Kaufmann C.A. (HZB), Eicke A., Schock H.-W. (HZB); **Optimization of Cu(In,Ga)Se₂ growth on stainless steel with the resulting impact on defect concentrations and device performance**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Fleischhammer M., Täubert C., Benk J., Tran H. Y., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Thermisches und elektrochemisches Verhalten von verschiedenen Kathodenmaterialien in LiPF₆-basierten Elektrolyten**; GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Ghicov A. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Kubiak P., Albu S.P. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Schmuki P. (Univ. Erlangen-Nürnberg), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Präparation und elektrochemische Leistungsdaten von selbstorganisierenden TiO₂-Nanotubes**; GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Guerin de Montgareuil A. (INES), Sicot L. (INES), Mohring H.-D., Stellbogen D., Zdanowicz T. (WrUT), Prorok M. (WrUT), Kolodenny W. (WrUT), Martin J.-L. (INES), Mezzasalma F. (INES), Delesse Y. (INES), Merten J. (INES); **First results of the application of the MotherPV method to CIS modules**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Hanisch J., Eicke A., Ahlswede E.; **Secondary ion and neutral mass spectrometry (SIMS/SNMS) of polymer solar cells**; E-MRS 2009 Spring Meeting, Strasbourg, 8-12 June 2009
- / Hariskos D., Menner R., Powalla M., Naghavi N. (IRDEP), Hubert C. (IRDEP), Lincot D. (IRDEP); **The ZnS/ZnMgO buffer combination in Cu(In_xGa_{1-x})Se₂-based solar cells: Up-scaling to 30 x 30 cm² modules**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Haug V., Quinitilla A., Ahlswede E.; **CIGS solar cells with very thin absorber layers**; 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, 7-12 June 2009
- / Herb F. (Daimler), Jossen A., Reff S. (Daimler), Wöhr M. (Daimler); **Investigation of Li-battery and fuel cell aging in FC hybrid car model**; Eleventh Grove Fuel Cell Symposium, London, 23 Sept. 2009
- / Holber M. (Göteborg Univ.), Carlsson A., Johansson P. (Göteborg Univ.), Jörissen L., Jacobson P. (Göteborg Univ.); **Raman investigation of degradation and ageing effects in fuel cell membranes**; 216th Meeting of The Electrochemical Society, Vienna, 4-9 Oct. 2009
- / Izquierdo-Roca V. (Univ. de Barcelona), Fontané X. (Univ. de Barcelona), Calvo-Barrio L. (Univ. de Barcelona), Álvarez-García J. (Univ. de Barcelona, CRIC), Pérez-Rodríguez A. (Univ. de Barcelona, IREC), Morante J. R. (Univ. de Barcelona, IREC), Witte W., Klenk R. (HZB); **Characterization of secondary phases in Cu-poor CuInSe₂: Surface and in-depth resolved Raman scattering analysis of polycrystalline layers**; MRS 2009 Spring Meeting, San Francisco, 13-17 April 2009
- / Jagomägi A. (Univ. Tallin), Mottus E. (Univ. Tallin), Stellbogen D., Mohring H.-D., Betts T. (Univ. Loughborough), Gottschalg R. (Univ. Loughborough), Zdanowicz T. (WrUT), Kolodenny W. (WrUT), Prorok M. (WrUT), Friesen G. (SUPSI-ISAAC), Pola I. (SUPSI-ISAAC), Dominé D. (SUPSI-ISAAC), Guerin de Montgareuil A. (CEA/INES), Fabero F. (CIEMAT), Faiman D. (Blaustein Inst.), Herrmann W. (TÜV Rheinland); **European network of PV outdoor testing – Steps towards harmonized procedures**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Jol J. C. (Ecofys), van Kampen B. J. M. (TNO), De Boer, B. J. (ECN), Reil F. (TÜV Rheinland), Geyer D.; **New test methods for BIPV: Results from IP performance**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Kaifal A., Huckle R., Felder M.; **Tropospheric ozone from GOME-2 NNORSY retrievals**; ESA Atmospheric Science Meeting, Barcelona, 7-11 Sept. 2009
- / Kaifal A., Huckle R., Felder M.; **NNORSY Ozone Profile Retrieval for GOME-2**; EUMETSAT - Meteorological Satellite Conference, Bath, 21-25 Sept. 2009
- / Kaufmann C. (HZB), Caballero R. (HZB), Eicke A., Rissom T. (HZB), Eisenbarth T. (HZB), Unold T. (HZB), Schorr S. (FU Berlin), Stephan C. (HZB), Klenk R. (HZB), Schock H.-W. (HZB); **Aspects for the optimization of CIGSe growth at low temperatures for application in thin film solar cells on polyimide foil**; 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, 7-12 June 2009
- / Kelm T.; **Freiflächen-PV-Anlagen in Deutschland - Monitoring Ergebnisse**; 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 3.-6.3.2009
- / Köhl M. (FhG-ISE), Ferrara C. (FhG-ISE), Mohring H.-D.; **Qualification of technical components for different climates - Challenge for PV module design and testing**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Krüger P., Kuhn R., Hartnig C., Manke I. (TU Berlin); **In situ visualization of liquid water formation and transport processes in PEM fuel cells**; 216th Meeting of The Electrochemical Society, Vienna, 4-9 Oct. 2009, Meet. Abstr. Electrochem. Soc., ISSN 1091-8213, MA2009-02 / B8 - Proton Exchange Membrane Fuel Cells 9 (PEMFC)), Abstr. 850
- / Krüger P., Kuhn R., Manke I. (TU Berlin), Hartnig C.; **In situ visualization of liquid water formation and transport processes in PEM fuel cells**; HyFC Academy School on Fuel Cells and Hydrogen, Vancouver, 26 May 2009
- / Lincot D. (ENSCP), Naghavi N. (ENSCP), Hariskos D.; **State of the art of buffer layers in CIGS solar cells**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009

- / Mack P. (HS Ulm), Walter T. (HS Ulm), Hariskos D., Schäffler R. (WS); **Endurance testing and accelerated ageing of CIGS thin film solar cells**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Marquard-Möllenstedt T., Specht M., Brellochs J., Zuberbühler U., Naab P. (TBM), Bernhart M. (TBM), Graf F. (DVGW/EBI); **Lighthouse Project: 10 MWth demonstration plant for biomass conversion to SNG and power via AER**; 17th European Biomass Conference & Exhibition – From Research to Industry and Markets, Hamburg, 29 June - 3 July 2009, pp. 2008-2012
- / Memm M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Synthese, Charakterisierung und Elektrochemie von $\text{LiCo}_{1-x}\text{M}_x\text{PO}_4$ (M=Fe, Mn)**; GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Mohring H.-D., Jossen A., Braun M. (FhG-IWES), Landau M. (FhG-IWES), Schmiegel A. (Vollwerk Electronics); **Renewable energy system with Lithium-ion battery for residential and small commercial applications (Solion)**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Mohring H.-D., Powalla M.; **Status - PV Dünnschicht**; 7. Österreichische Photovoltaik-Fachtagung, Wien, 17.-18.6.2009
- / Naghavi N. (IRDEP), Darga A. (LGEP), Jehl Z. (IRDEP), Bockelee V. (IRDEP), Renou G. (IRDEP), Hariskos D., Powalla M., Lincot D. (IRDEP); **Study of ZnS/CdS and CdS/ZnS buffer bi layers with i-ZnO and ZnMgO/ZnO:Al windows layer in CIGS solar cells**; E-MRS 2009 Spring Meeting, Strasbourg, 8-12 June 2009
- / Obeidi S. (Univ. Münster), Würz R., Eicke A., Stolwijk N. (Univ. Münster); **Diffusion of substrate impurities into solar-grade CIGS layer structures**; DPG-Frühjahrstagung, Dresden, 22.-27.3.2009
- / Obeidi S. (Univ. Münster), Würz R., Eicke A., Stolwijk N. (Univ. Münster); **Diffusion of Fe into solar-grade Cu(In,Ga)Se₂**; MRS 2009 Spring Meeting, San Francisco, 13-17 April 2009
- / Ottmüller M., Musiol F., Püttner A., Zimmer U.; **Working Group on Renewable Energies – Statistics (AGEE-Stat)**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Pfanzelt M., Kubiak P., Geserick J. (Univ. Ulm), Hüsing N. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **TiO₂ Rutil – Ein aufstrebendes Anodenmaterial für Li-Ionen-Batterien**; GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Powalla M.; **Perspektiven der Dünnschicht-Technologien**; 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4.-6.3.2009
- / Powalla M., Schock H.-W.; **Copper Indium Selenide / Sulfide – A Success Story**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Quintilla A., Ungelenk J., Haug V., Ahlswede E.; **Non-vacuum fabrication of CuInSe₂ (CIS) thin-film solar cells from nanoparticles**; Euromat 2009, European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes, Glasgow, 7-10 Sept. 2009
- / Reichert M., Wachtler M., Kurzweil P. (HS Amberg-Weiden), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Effekt von filmbildenden Elektrolytadditiven auf die Zyklierbarkeit von Grafit-Anoden in BMPL-TFSI-basierten Elektrolyten**; Wissenschaftsforum Chemie 2009, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Reichert M., Wachtler M., Kurzweil P. (HS Amberg-Weiden), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Compatibility of electrolytes based on BMPL-TFSI with graphite anodes for Li-ion batteries**; 216th Meeting of The Electrochemical Society, Vienna, 4-9 Oct. 2009
- / Sample T. (Europ. Comm. Ispra), Skoczek A. (Europ. Comm. Ispra), Field M. (Europ. Comm. Ispra), Köhl M. (FhG-ISE), Geyer D., Herrmann W. (TÜV Rheinland); **Accelerated ageing of seven different thin-film module types by sequential exposure damp heat or damp heat with either additional applied voltage or ultraviolet light**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Specht M., Baumgart F., Feigl B., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Hahn B. (IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **New routes for the production of substitute natural gas (SNG) from renewable energy**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Specht M., Baumgart F., Feigl B., Frick V., Stürmer B., Zuberbühler U., Sterner M. (IWES), Hahn B. (IWES), Waldstein G. (Solar Fuel); **New routes for the production of substitute natural gas (SNG) from renewable energy**; Kraftstoffe der Zukunft, Berlin, 1.12.2009
- / Staiß F., Schmid J. (IWES); **Megatrends – Herausforderungen – Strategien**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Stellbogen D., Mohring H.-D.; **Vergleichbarkeit von Ertragsmessungen an PV-Modulen und PV-Generatoren**; 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 4.-6.3.2009
- / Täubert C., Fleischhammer M., Wohlfahrt-Mehrens M., Wietelmann U. (Chemetal), Buhrmester T. (Chemetal); **LiBOB als Leitsalz oder Additiv für Lithium-Ionen-Batterien**; GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Tran H. Y., Haselrieder W. (TU Braunschweig), Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M., Kwade A. (TU Braunschweig); **Einfluss der Elektrodenpräparation auf das elektrochemische Verhalten der Kathoden in Lithium-Ionen-Batterien**; GDCh-Wissenschaftsforum Chemie, Frankfurt a. M., 30.8.-2.9.2009
- / Turak A. (MPI-MF), Hanisch J., Barrena E. (MPI-MF), Welzel U. (MPI-MF), Widmaier F., Ahlswede E., Dosch H. (MPI-MF); **Relative interdependence of processing parameters on the ordering and performance of P₃HT:PCBM solar cells**; ICMAT 2009 - International Conference on Materials for Advanced Technologies, Singapore, 28 June - 3 July 2009
- / Vogel-Sperl A., Langniss O. (Fichtner), Diekmann J. (DIW), Braun F. (DIW); **Best practice für den Ausbau Erneuerbarer Energien**; IEWT 2009, 6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 11.-13.2.2009
- / Wagner M., Würz R., Kessler F., Rahm A. (Solarion), Scheit C. (Solarion), Ragnow S. (Solarion); **Post-monolithic interconnection of CIGS solar cells**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Witte W., Hariskos D., Kniese R., Powalla M.; **Charge distribution in CIGS thin-film solar cells with ZnS/(Zn,Mg)O and CdS/i-ZnO buffer combinations**; 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 21-25 Sept. 2009
- / Witte W., Kniese R., Powalla M.; **Influence of the Cu content on structural and vibrational properties in polycrystalline CuGaSe₂ thin films**; MRS 2009 Spring Meeting 2009, San Francisco, 13-14 April 2009
- / Würz R., Kaufmann C.A. (HZB); **Flexible CIGS thin-film solar cells**; FVEE-Jahrestagung „Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien“, Berlin, 24.-25.11.2009
- / Zuberbühler U., Sichler P., Dürrbeck M., Marquard-Möllenstedt T., Specht M.; **Need for standardisation of test methods for sorbent / material characterisation**; 1st Meeting of High Temperature Solid Looping Cycles Network, Oviedo, 15-17 Sept. 2009
- / Zuberbühler U., Stürmer B., Specht M.; **Adjusting methanation stoichiometry via AER process**; Bio-SNG09 - Synthetic Natural Gas from Biomass, Zürich, 26-27 May 2009

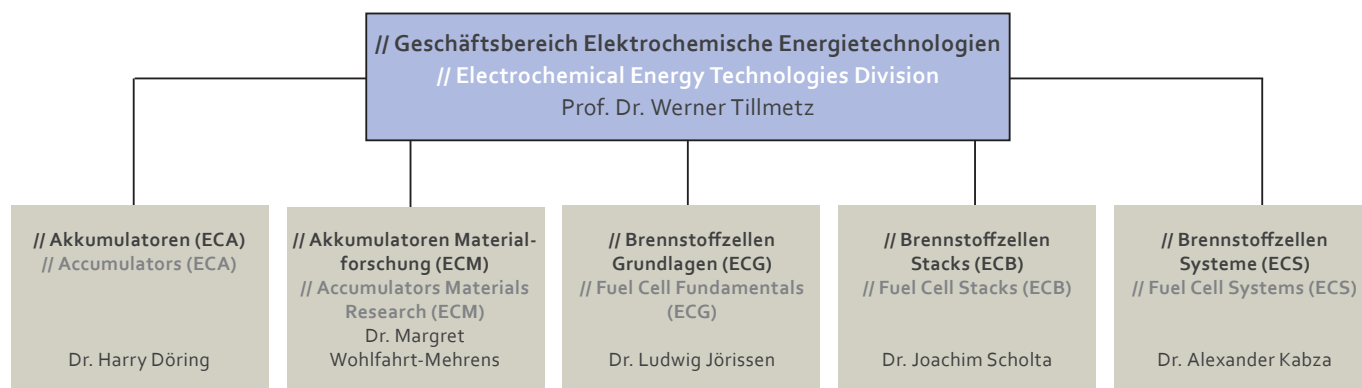
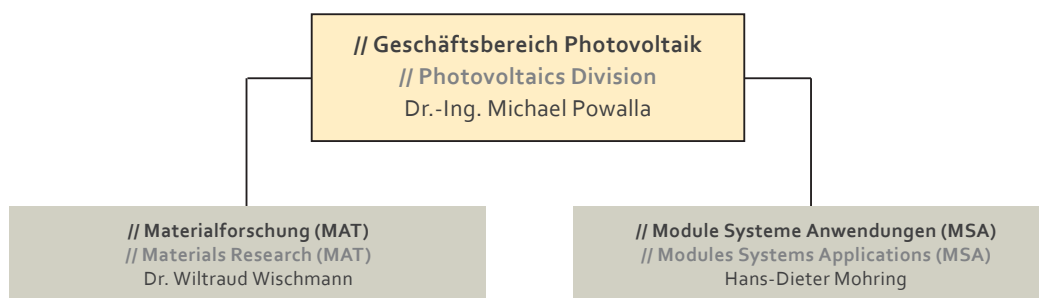
// Organigramm

Organisational Chart

// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart



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



// Standorte Locations



// Stuttgart



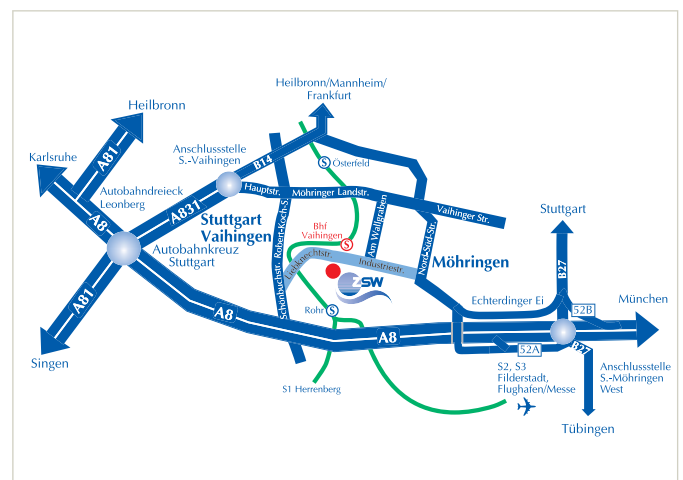
Industriestraße 6
70565 Stuttgart

Ansprechpartner / Contact

Claudia Brusdeylins

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

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





// Widderstall



Widderstall 14
89188 Merklingen

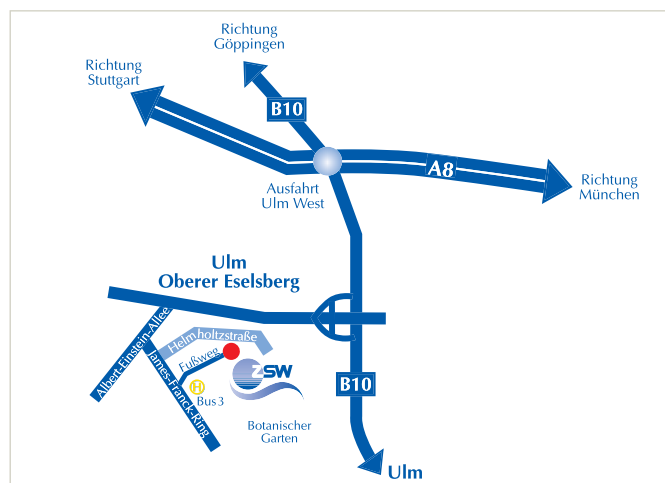
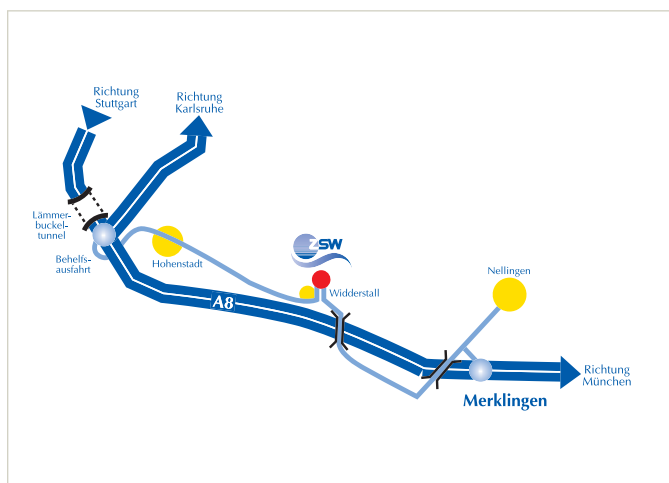
Ansprechpartner / Contact
Olaf Schanz
Phone: +49(0)7337 92 394-0
E-Mail: olaf.schanz@zsw-bw.de

// Ulm



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

Ansprechpartner / Contact
Tiziana Bosa
Phone: +49(0)731 95 30-610
E-Mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de



// Abkürzungen

Abbreviations

// Firmen, Institute, Institutionen

// Companies, Institutes, Institutions

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -Prüfung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
INES	Institut National de l'Énergie Solaire
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
CRIC	Centre de Recerca i Investigació de Catalunya
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.
EBI	Engler-Bunte-Institut
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands
EIFER	European Institute for Energy Research
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
ENSCP	École Nationale Supérieure de Chimie de Paris
ESA	European Space Agency
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FhG-ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
FhG-IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
FVEE	Forschungsverbund Erneuerbare Energien
FZJ	Forschungszentrum Jülich
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
HMI	Hahn-Meitner-Institut
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFW	Institut für Festkörper- und Werkstoff-Forschung
INM	Leibniz-Institut für Neue Materialien
IPV	Institut für Photovoltaik
IRDEP	Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque
IREC	Institut de Recerca en Energia de Catalunya
IREM	Institut Lavoisier, France
LGEP	Laboratoire de Génie Électrique de Paris
LTI	Lichttechnisches Institut
MPI-MF	Max-Planck-Institut für Metallforschung
MRS	Materials Research Society
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

SUPSI-ISAAC	Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana – Istituto Sostenibilità Applicata Ambiente Costruito
TBM	Technologieplattform Bioenergie und Methan
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
UBA	Umweltbundesamt
UniBW	Universität der Bundeswehr
WBZU	Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e. V.
WERES	Würth Elektronik Research GmbH
WrUT	Politechnika Wroclawska
WS	Würth Solar

// Technische Begriffe

// Technical Terms

AER	Absorption-Enhanced Reforming
APU	Auxiliary Power Unit
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics
CHP	Combined Heat and Power
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
DFB	Dual Fluidised Bed
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GuD	Gas und Dampf
MEA	Membran-Elektroden-Einheit / Membrane Electrode Assembly
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapour Deposition
NNORSY	Neural Network Ozone Retrieval System
NT / HT	Niedertemperatur / Hochtemperatur
ORC	Organic Rankine Cycle
PEFC	Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PEMFC	Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle
PV	Photovoltaik
SIMS	Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie / Secondary Ion Mass Spectrometry
SNG	Substitute Natural Gas / Erdgassubstitut
SNMS	Sekundär-Neutraltelchen-Massenspektrometrie / Secondary Neutral Mass Spectrometry

// 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

Dr. Theresa Friedlmeier

Gudrun Scherg

Ulrike Zimmer

// Koordination Coordination

Karl-Heinz Frietsch

// Layout & Satz Layout & Setting

Sieber & Wolf Werbeagentur

Hofgut Mauer 1

70825 Korntal-Münchingen

www.sieberundwolf.de



Der Jahresbericht wurde auf
FSC-zertifiziertem Papier gedruckt.

This annual report was printed
on FSC-certified paper.

Stuttgart:

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

Solar-Testfeld Widderstall:

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

Ulm:

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

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

