



// ERGEBNISSE
RESULTS

2013

// Inhalt

Contents

| | |
|----|--|
| 2 | Vorwort / Foreword |
| 4 | Stiftung / Foundation |
| 5 | Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees |
| 6 | Erfolge 2013 / Achievements 2013 |
| 12 | Schwerpunktbericht: Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende Focus Report: Hydrogen – a Key to the Energy Turnaround |
| 28 | Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects |
| 30 | Systemanalyse / Systems Analysis |
| 34 | Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research |
| 38 | Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications |
| 42 | Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes |
| 46 | Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research |
| 50 | Produktionsforschung / Production Research |
| 54 | Akkumulatoren / Accumulators |
| 58 | Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals |
| 60 | Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks |
| 64 | Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems |
| 66 | Mitarbeiter Verwaltung, Werkstätten und IT / Staff in Administration, Workshop and IT |
| 68 | Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations |
| 76 | 25 Jahre ZSW / 25 Years of ZSW |
| 78 | Dokumentation / Documentation |
| 80 | Finanzielle Entwicklung / Financial development |
| 82 | Personalentwicklung / Staff Development |
| 84 | Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications |
| 88 | Organigramme / Organisational Charts |
| 90 | Standorte / Locations |
| 92 | Abkürzungen / Abbreviations |
| 93 | Impressum / Imprint |

// Copyright

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

// Copyright

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

//Vorwort Foreword

Die neu gewählte Bundesregierung sieht im wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Erfolg der Energiewende eines ihrer wichtigsten Themen und hat dazu die Zuständigkeiten in den Bundesministerien neu definiert und fokussiert. Es gilt, Herausforderungen zu bewältigen und gleichzeitig die Chancen zu nutzen, die die Energiewende nicht zuletzt als Innovationstreiber par excellence für die deutsche Wirtschaft bietet.

In diesem Sinne befasst sich der Themenschwerpunkt des vorliegenden Jahresberichtes mit Wasserstoff. Als originäres Arbeitsgebiet des ZSW entwickelt sich Wasserstoff zunehmend zu einem Schlüsselement für die Transformation unseres Energiesystems. Dafür entwickeln wir Elektrolyseverfahren, Brennstoffzellen für Hausheizungen und Fahrzeuge sowie Power-to-Gas-Technologien, um z. B. mittels der Einspeisung von regenerativem Methan in das Erdgasnetz Energieinfrastrukturen und -anwendungen miteinander zu vernetzen.

Des Weiteren präsentiert der Bericht wichtige Projekte und Highlights des vergangenen Jahres, die vom Wirkungsgrad-Weltrekord für Dünnschicht-Solarzellen über den Aufbau einer Forschungsproduktionsanlage für große Lithium-Ionen-Zellen bis hin zum Monitoring der Energiewende reichen.

Wir freuen uns über das anhaltend hohe Interesse an unseren Forschungs- und Entwicklungsergebnissen. Neben der Berichterstattung in den Medien und zahlreichen Besuchen war für uns die Feier zum 25-jährigen Bestehen des ZSW im vergangenen Jahr ein besonderer Anlass, um mit vielen Wegbegleitern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Gesellschaft und Politik ein Vierteljahrhundert ZSW Revue passieren zu lassen und einen Blick in die Zukunft zu werfen.

Der Dank des Vorstandes gilt zuerst allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, deren großartiger Einsatz unsere Erfolge ermöglicht. Besonderer Dank gilt auch den Mitgliedern des Kuratoriums und dessen Vorsitzendem, Professor Christian Mohrdieck. Dem Land Baden-Württemberg danken wir für die finanzielle Förderung und hervorragende Zusammenarbeit ebenso wie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

Den Leserinnen und Lesern wollen wir mit dem Jahresbericht 2013 Einblicke in unser Themen- und Leistungsspektrum geben. Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre!

The recently elected German federal government considers the economic, ecological and social success of the Energiewende – the energy turnaround – to be one of its most important issues and, to this end, has redefined and refocussed responsibilities in the federal ministries. It is now essential to master the challenges and, at the same time, utilise the opportunities that the energy turnaround offers for the German economy, not least as an innovation driver par excellence.

In this spirit, the main focus of this year's annual report is on hydrogen. As one of the focus areas of the ZSW (Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg), hydrogen has increasingly developed into a key element for transforming our energy system. For this purpose, we are developing electrolysis processes, fuel cells for domestic heating and vehicles, and Power-to-Gas technologies in order to integrate energy infrastructures and applications with one another, for example by feeding renewable methane into the natural gas network.

In addition, the report presents important projects and highlights of the last year, which range from the world record in efficiency for thin-film solar cells and the construction of a research production facility for large-scale lithium-ion cells to the monitoring of the energy turnaround.

We are delighted in the sustained high level of interest in our research and development findings. In addition to the media reports and numerous visits, the celebrations last year marking the 25th anniversary of ZSW provided a special occasion not only to look back at a quarter of a century of ZSW together with many friends from science, business, society and politics, but also to take a glimpse into the future.

The Board of Directors would first of all like to thank all the staff whose excellent dedication has enabled our success. In particular, we would also like to thank the members of the Board of Trustees and its Chairman, Professor Christian Mohrdieck. We would also like to thank the Federal State of Baden-Württemberg for its financial support and excellent cooperation as well as our partners in companies, public research funding and science.

With the 2013 Annual Report, we would like to give readers an insight into the range of topics and services we are active in, and we wish you all an enjoyable read.



// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Prof. Dr. Michael Powalla



// Stiftung Foundation

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

Stiftungsauftrag:

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

Stifter des ZSW / The founders are

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

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

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

The goal of the foundation is:

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

Unternehmen / Commercial enterprises

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

// Mitglieder des Kuratoriums Members of the Board of Trustees

Vorsitzender / Chairman

- > Prof. Dr. Christian Mohrdieck

Stellvertreter / Vice Chairmen

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

Ministerien und Organisationen / Ministries and Organisations

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

Universitäten / Universities

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

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

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

Fraunhofer-Gesellschaft

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

Wissenschaft / Science

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

Wirtschaft / Commercial enterprises

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



//Erfolge 2013
Achievements 2013

// Erfolge 2013 Achievements 2013

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung deutlich zu erhöhen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch die Entwicklung neuer und effizienterer Energietechnologien und ihren Transfer in den Markt. So wurden auch 2013 wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

Das Kapitel „Erfolge 2013“ präsentiert Ihnen die Highlights des Jahres auf einen Blick.

// Monitoring-Bericht zur Energiewende in Baden-Württemberg vorgelegt

Anfang November hat das ZSW-Fachgebiet Systemanalyse den ersten Monitoring-Bericht zur Energiewende in Baden-Württemberg im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft vorgestellt. Dabei konnte für den wesentlichen Untersuchungsbereich des Berichts, die Versorgungssicherheit im Stromsektor, Entwarnung gegeben werden. Prof. Dr. Frithjof Staiß erklärte dazu: „Zumindest bis zur gesetzlich festgelegten Stilllegung des Kernkraftwerks Philippsburg 2 Ende 2019 ist die Versorgungssicherheit in Baden-Württemberg gewährleistet.“

// Vertragsunterzeichnung mit Industrie zur Nutzung der neuen Forschungsproduktionslinie (FPL)

In Europa gibt es bislang nur begrenzte Kenntnisse in der Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen. Eine neue Forschungsproduktionsanlage am ZSW in Ulm, die vom Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien (KLiB) initiiert wurde, in dem zahlreiche deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen zusammengeschlossen sind, soll das ab 2015 ändern. Führende deutsche Industrieunternehmen werden am ZSW seriennahe Herstellungsverfahren für standardisierte große (20 Ah) Lithium-Akkus entwickeln. Im Herbst erfolgte die vertragliche Regelung mit den Industriepartnern über die Anlagennutzung. Darüber hinaus ermöglicht die Anlage Herstellern von Batteriematerialien, neue Rezepturen in Standardzellen zu erproben, oder Maschinenherstellern die Optimierung von Fertigungstechnologien.

// Erweitertes Batterietestzentrum für Fahrzeugbatterien

Die vor zwei Jahren erheblich erweiterte Batterietestinfrastruktur im ZSW wird stark nachgefragt und das Kundenspektrum wird deutlich internationaler. Kern der Aktivitäten sind nach wie vor Sicherheitstests und Lebensdaueruntersuchungen von Zellen,

“Energy with a future” describes the goal of considerably increasing the proportion of renewable energy sources used to supply energy. ZSW is pursuing this goal by developing new and more efficient energy technology and ensuring its transfer to the market, whereby excellent results were also achieved in 2013 in the core topic areas.

This section, Achievements 2013, presents the year’s highlights at a glance.

// Monitoring report on energy turnaround in Baden-Württemberg submitted

In early November, ZSW’s Systems Analysis research department presented the first monitoring report on the energy turnaround in Baden-Württemberg on behalf of the Ministry for the Environment, Climate Protection and the Energy Sector. The all-clear was given for the report’s main focus, namely security of supply in the power sector. Prof. Dr. Frithjof Staiß commented on this, saying: “Security of supply in Baden-Württemberg is guaranteed at least until the statutory decommissioning of the nuclear power plant Philippsburg 2 at the end of 2019.”

// Contract with industry on the use of the new research production line (FPL)

In Europe, there is only limited knowledge of the production of large lithium-ion cells. A new research production line at ZSW in Ulm, which was initiated by the Lithium-Ion Batteries Competence Network (KLiB), an association of numerous German corporations and research institutes, should improve the situation starting in 2015. Leading German industrial enterprises will develop near-series production processes for standardised, large (20 Ah) lithium batteries at ZSW. A contractual agreement on the use of the plant was sealed with industrial partners in autumn. In addition, the facility allows battery material manufacturers to validate new compositions in standard cells and machine manufacturers to optimise production technologies.

// Test centre expansion for vehicle batteries

The battery test infrastructure of ZSW, which was significantly expanded two years ago, is in high demand, with increasing international interest. Activities focussed on safety tests and lifetime testing of cells, modules and complete systems, including battery



// Feierliche Vertragsunterzeichnung über die Nutzung der vom Bund und dem Land Baden-Württemberg geförderten Anlage: v.l. ZSW-Vorstände, Industriepartner, Land, Stadt Ulm, Bund.
// Formal signing of the contract on the use of the facility funded by the federal government and the state of Baden-Württemberg: f.l. ZSW Board Members, industrial partners, state, city of Ulm, federal government.

Modulen und Komplettsystemen inklusive Batteriemanagementsystem. Hinzu kommen Langzeittests bei simulierten extremen Umweltbedingungen (hohe Luftfeuchtigkeit, rasche Temperaturwechsel) an Lithium-Ionen-Batterien für dezentrale Stromspeicher, für E-Motorräder und E-Bikes. Pkws können in einer befahrbaren Klima-Prüfkammer getestet werden. Mechanische Belastungen können auf dem neuen Vibrationsteststand oder einem Schockprüfstand simuliert und geprüft werden. Das Testzentrum wurde dafür um einen Shaker und einen Schockprüfstand erweitert, auf denen Vibrationsprüfungen in allen drei Achsen unter definierter Umgebungstemperatur (-60 °C bis +150 °C) mit einem Gewicht bis rund 70 kg ausgeführt werden können.

// ZSW koordiniert europäischen Verbund zur Entwicklung einer neuen Generation fahrzeugtauglicher Brennstoffzellen
Mit dem Ziel, eine neue Brennstoffzellen-Generation für den automobilen Einsatz zu entwickeln, haben sich neun europäische Automobilhersteller und Zulieferer sowie fünf führende Forschungsinstitute zu „Auto-Stack CORE“ verbündet. In dem vom ZSW koordinierten Verbund soll ein Brennstoffzellen-Stack für Fahrzeuge entstehen, dessen Komponenten von der Bipolarplatte bis hin zur Membran-Elektroden-Einheit (MEA) neu entwickelt, getestet und auf ihre Fahrzeugtauglichkeit, Leistungsfähigkeit und Beständigkeit überprüft werden. Die Hardwareentwicklungen erfolgen bei kontinuierlichem Kostenmanagement.

management systems. Under simulated extreme ambient conditions (high humidity and rapid temperature changes), advanced long-term tests are performed on large lithium-ion batteries for decentralised electricity storage systems, for electric bicycles and motorcycles. Electric cars can be tested in a vehicle-accessible climate chamber. Mechanical loads can be simulated and tested with either the new vibration test rig or the shock test rig. The test centre has been equipped with a shaker and a shock test rig, with which vibration tests can be carried out in all three dimensions, at defined ambient temperatures (-60 °C to +150 °C) and loads up to 70 kg.

// ZSW coordinates a European cluster for the development of a new generation of fuel cells suitable for vehicles
With the aim of developing a new generation of fuel cells for automobiles, nine European automotive manufacturers and suppliers, as well as five leading research institutes, have joined forces to form “Auto-Stack CORE”. The purpose of the association coordinated by ZSW is to create a fuel cell stack for vehicles with newly developed components – from the bipolar plate to the membrane electrode assembly (MEA) – that have been tested and examined in terms of their suitability for vehicle applications, their performance and durability. Hardware developments are taking place alongside continuous product cost assessment.



// Das ZSW hat im Auftrag des Landesumweltministeriums den ersten Monitoring-Bericht zur Energiewende in Baden-Württemberg erstellt.
// On behalf of the State Ministry for the Environment, ZSW has presented the first monitoring report on the energy turnaround in Baden-Württemberg.



// Shaker für mechanischen Belastungstest von Batterien und Brennstoffzellen im Testzentrum.
// Shaker for mechanical stress tests for batteries and fuel cells at the test centre.

// Erfolge 2013 Achievements 2013

// CIGS-Solarzelle überholt mit 20,8% Wirkungsgrad die multikristalline Siliziumtechnologie

Im Wettlauf um eine höhere Stromausbeute von Solarzellen hat das ZSW einen neuen Bestwert erzielt: Der eigene Weltrekord für CIGS-Dünnschicht-Solarzellen von 20,3% (2010) wurde auf 20,8% verbessert. Damit übertrifft die ZSW-Technologie nach 30 Jahren erstmals die Effizienz der im Markt vorherrschenden multikristallinen Silizium-Solarzellen. Der neue Bestwert zeigt das bislang noch nicht ausgeschöpfte technische und wirtschaftliche Potenzial der CIGS-Dünnschicht-Technologie und trägt dazu bei, dass die Kosten für Solarstrom künftig noch weiter gesenkt werden können.

// Neues Solarzellenmaterial: ZSW erreicht 10,3% Wirkungsgrad mit Absorbermaterial Kesterit

Bei der Suche nach günstigeren Materialien und Herstellungsverfahren für effiziente Dünnschicht-Solarzellen hat das ZSW einen vereinfachten Produktionsprozess für Kesterit-Zellen entwickelt. Die beste Zelle erreicht einen Wirkungsgrad von 10,3% – ein neuer Bestwert in Europa. Die neue Verbindung ist dem CIGS sehr ähnlich, enthält aber statt Indium und Gallium die Elemente Zink und Zinn. Sie ermöglicht auch eine günstigere Produktion mit einem einfachen Druckverfahren. Zur Herstellung der Kesterit-Solarzellen wird Substratglas mit einer nichttoxischen Tintenlösung mit den gewünschten Elementen beschichtet – und das ohne aufwendige Vakuumtechnologie. Die so hergestellte Vorläufer- oder Precursor-Schicht wird anschließend unter Hitze einwirkung selenisiert. Die weitere Verarbeitung erfolgt mit den gleichen Verfahren wie bei der verwandten CIGS-Technologie.

// The CIGS solar cell achieves 20.8% efficiency and outperforms multicrystalline silicon technology

In the race for higher efficiencies, ZSW has set a new world record for power yields in solar cells. Its own world record for CIGS thin-film solar cells of 20.3% (2010) has been enhanced to 20.8%. With this record, ZSW technology has exceeded the efficiency of prevailing multi-crystalline silicon solar cells for the first time in 30 years. The new optimum value demonstrates the untapped technical and economic potential of CIGS thin-film technology and will help to reduce the cost of solar power even further in the future.

// New solar cell material: ZSW achieves 10.3% efficiency with Kesterite absorber material

In its search for cheaper materials and manufacturing processes for efficient thin-film solar cells, ZSW has developed a simplified production process for Kesterite cells. The top-performing cell reaches an efficiency of 10.3% – a new European record. The new compound is similar to CIGS; however, instead of indium and gallium, it contains the elements tin and zinc. Thanks to the new compound, the production method, which involves a simple printing process, is less expensive and less complex: during the Kesterite solar cell manufacturing process, substrate glass is coated with a non-toxic ink solution containing the desired elements – without the need for any complex vacuum technology. The resulting precursor layer is then selenised in a heating process. The remaining production process involves the same methods as the related CIGS technology.

// PID-Messplatz zur Untersuchung von PV-Modulen im Feld

Bei PV-Modulen, die im Feld in Strängen zu hoher Spannung in Serie verschaltet sind, kann die potenzialinduzierte Degradation (PID), eine Verschlechterung der Modulleistung, auftreten. Auslöser sind Leckströme, die bei feuchter Umgebung über die Moduloberfläche durch das Glas zur Zelle fließen. Dem Problem kann zwar auf Systemebene durch Erdung der negativen Seite des Stranges sowie auf Modulebene durch besser isolierende Verkapselungsmaterialien und PID-resistente Zellen begegnet werden. Größtes Problem ist aber die fehlende Korrelation zwischen der PID-Prüfung im Labor und dem echten Verhalten im Feld. Um diese Lücke zu schließen, wurde ein Monitoring-System entwickelt und am Testfeld Widderstall aufgebaut, das erstmalig eine In-situ-Beobachtung des PID-Verlaufs eines unter kritisches Potenzial gesetzten Moduls ermöglicht. Das PID-Stabilitätsverhalten von PV-Modulen kann nun im Feld beobachtet und mit den Ergebnissen aus den Laboruntersuchungen korreliert werden. Damit ist die Voraussetzung für ein besseres Verständnis des Effekts geschaffen.

// Methan aus P2G®-Anlage erreicht Erdgasqualität

Einen weiteren Forschungserfolg für seine Power-to-Gas-Technologie verbuchte das ZSW im Juli 2013: Erstmals ist es gelungen, ein besonders reines Methan in der vom Bundesumweltministerium geförderten 250-kW_{el}-P2G®-Anlage zu erzeugen. Mit 99%igem Methananteil ist das regenerative Gas so hochwertig wie russisches Erdgas; folglich erfüllt es die Gaseinspeise-Richtlinien voll und ganz. Das verbleibende Prozent setzt sich aus Wasserstoff und Kohlendioxid zusammen. Ermöglicht hat diese hervorragende Gasqualität eine Membrantechnologie. Mithilfe der Membran wird das Gas nach der Methanisierung aufbereitet.

// PID measuring station for the examination of PV modules in the field

Potential-induced degradation (PID) can occur in PV modules that are series-connected in the field to form high-voltage strings, deteriorating their performance. Triggers include leakage currents in humid environments that leak through the glass into the cell via the module's surface. Although the problem can be addressed at the system level by earthing the negative side of the string, and at the module level, by better insulating encapsulation materials and PID-resistant cells, the larger problem of a missing correlation between the PID inspection in the laboratory and the actual field behaviour remains. In order to close this knowledge gap, a monitoring system has been developed and built at the Widderstall test facility that, for the first time, allows in situ observations of the PID process of a module to which a critical potential is applied. PID stability of PV modules can now be observed in the field and correlated with the results of laboratory tests. Thus, the necessary conditions for a better understanding of the effect have been brought about.

// Methane from P2G® plant achieves natural gas quality

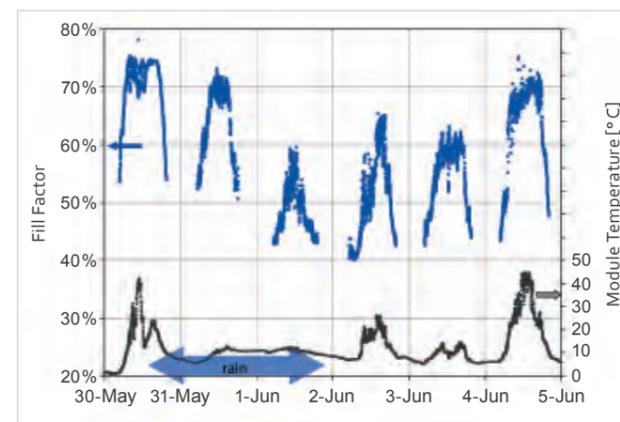
ZSW succeeded in another research area in July 2013, namely Power-to-Gas technology: for the first time ever, researchers succeeded in producing exceptionally pure methane in the 250-kW_{el} P2G® plant, which is funded by the German Federal Ministry for the Environment. With a methane content of 99%, this regenerative gas has the same high quality as Russian gas, and consequently it fully complies with statutory requirements regarding gas feed-in. The remaining 1% is hydrogen and carbon dioxide. This excellent gas quality was achieved with membrane technology. The gas is processed using the membrane after methanisation.



// Einem ZSW-Forscherteam gelingt ein neuer Weltrekord bei CIGS-Zellen.
// A ZSW research team sets a new world record for CIGS cells.



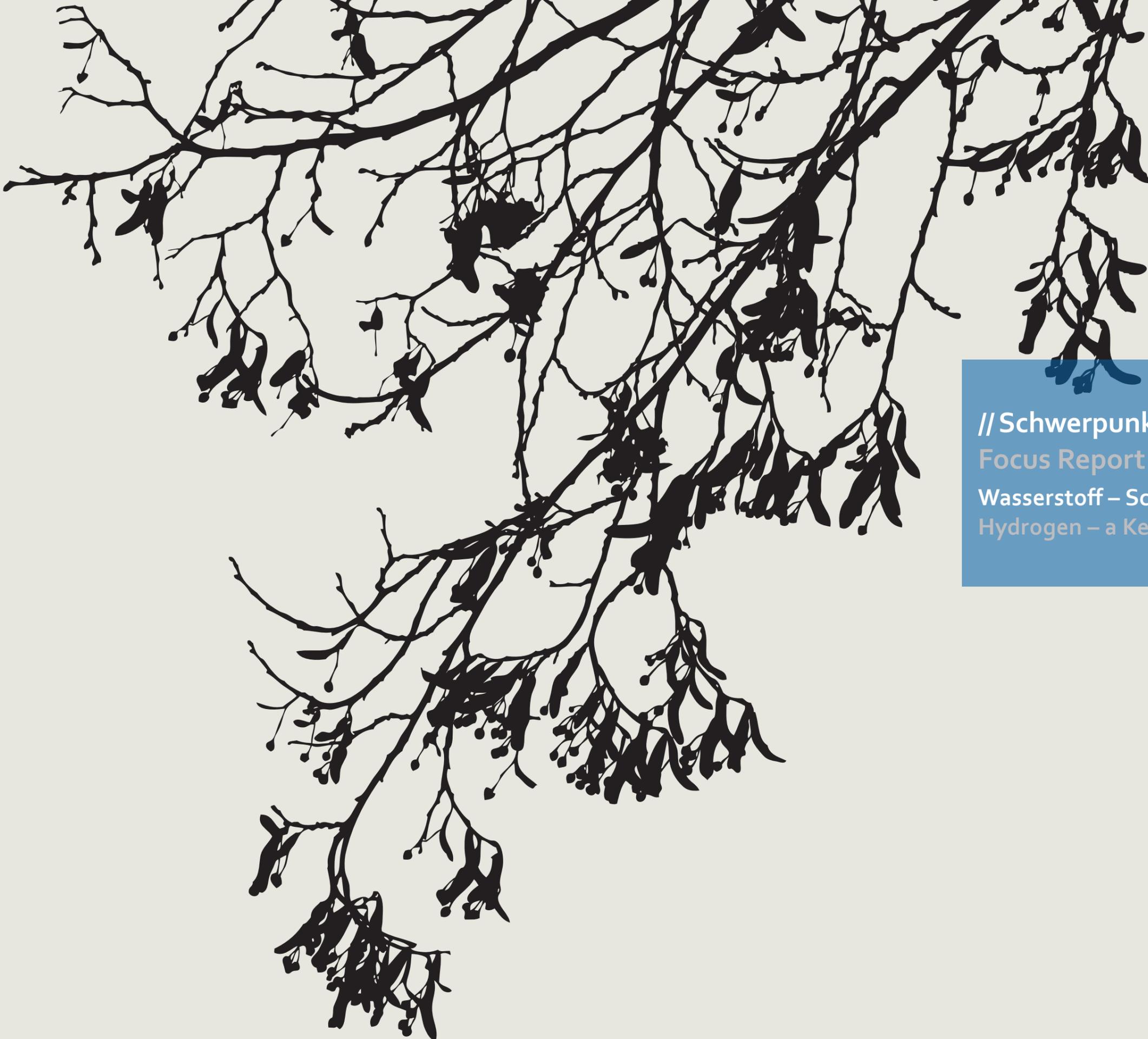
// Mitarbeiterin des ZSW bei der Vorbereitung des neuen Kesterit-Materials.
// ZSW researcher prepares the new Kesterite material.



// Einbruch und Erholung des Füllfaktors (blau) eines c-Si-Moduls im PID-Feldtest. Ebenso gezeigt ist der Verlauf der Modultemperatur (schwarz).
// Drop and subsequent recovery of the fill factor (blue) of a c-Si module in the PID field test. Also shown is the module temperature history (black).



// Bei der Gasaufbereitung kommt eine am ZSW entwickelte Membrantechnologie zum Einsatz.
// The membrane technology developed by ZSW is used for gas processing.



// Schwerpunktbericht 2013

Focus Report 2013

Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende

Hydrogen – a Key to the Energy Turnaround

// Schwerpunktbericht 2013

Focus Report 2013

Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende Hydrogen – a Key to the Energy Turnaround

// FOCUS

// Wasserstoff – Schlüssel zur Energiewende

Seit seiner Gründung vor 25 Jahren beschäftigt sich das ZSW mit der Erzeugung und Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff (H₂) als Energieträger. Vor dem Hintergrund der stetigen Verknappung fossiler Brennstoffe sowie der globalen und nationalen Klimaschutzziele hatte dieses Thema schon immer eine besondere Relevanz für die Forschungen am ZSW. Die Gründerväter des ZSW haben das Potenzial von H₂ für den Kraftstoff- und Energiemarkt von Beginn an erkannt, und so trägt unser Institut nicht zufällig den Begriff „Wasserstoff“ in seinem Namen.

// Hydrogen – a key to the energy turnaround

Since it was founded 25 years ago, ZSW has been concerned with the generation and use of renewable hydrogen (H₂) as an energy carrier. In view of the increasing shortage of fossil fuels and the global and national climate protection goals, this issue has always had a particular relevance for the research at ZSW. The founding fathers of ZSW recognised the potential of H₂ for the fuel and energy market right from the beginning, and it is therefore no coincidence that the institute bears the word "Hydrogen" in its name.

Wasserstoff wird heute in der fast unvorstellbaren Menge von jährlich 500 Milliarden Kubikmetern in der chemischen Industrie und Petrochemie erzeugt. Ein Großteil dient der Herstellung von Ammoniak für die Kunstdüngererzeugung, aber auch für Kunststoffe, bei der Fetthärtung, der Stahlproduktion sowie in der Glas- und Halbleiterindustrie wird Wasserstoff benötigt. Dieser Wasserstoff wird heute fast ausschließlich durch Reformierung aus Erdgas oder anderen Kohlenwasserstoffen hergestellt.

Der regenerativen Erzeugung von H₂ kommt derzeit weltweit ein deutlich steigender Stellenwert zu – auch in der Forschung an den beiden Standorten des ZSW in Stuttgart und Ulm. H₂ ist das Synonym für eine nachhaltige Energieversorgung, die weitgehend – und in der Zukunftsperspektive auch vollständig – auf erneuerbaren Energien beruht. Die Forschungen in den Bereichen Elektrolyse, Power-to-Gas (P₂G[®]) und Brennstoffzellen zählen zu den wichtigsten Schwerpunkten des ZSW – und die Brücke zwischen all diesen Technologien bildet Wasserstoff.

// Impuls für die Wirtschaft

Wasserstoff als Energieträger kann vielfältig verwendet werden: als Kraftstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge oder zur Einspeisung in das Erdgasnetz verbunden mit der anschließenden Strom- bzw. Wärmeerzeugung mit Gasturbinen, Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen. Ganz im Gegensatz zu den heute getrennten Systemen der Stromversorgung und der Kraftstoffversorgung ermöglicht es Wasserstoff, die unterschiedlichen Wirtschafts- und Industriebranchen miteinander zu verbinden: Automobilhersteller, die Mineralölwirtschaft, die an ihren Tankstellen zusehends Wasserstoff anbieten wird, Strom- und Gaserzeuger, die chemische Industrie und auch private Haushalte werden Teil der H₂-Infrastruktur im Energiesystem der Zukunft. Insbesondere die Automobilindustrie hat die Chance, über Wasserstoff den Kraftstoffanteil aus erneuerbaren Energien deutlich zu erhöhen.

Daraus ergeben sich auch neue Impulse für die Wirtschaft, wie eine ZSW-Studie aus dem vergangenen Jahr zeigt: Bis zum Jahr 2030 sind über alle Marktsegmente für Wasserstoff und Brenn-

Today, an almost unimaginable volume of hydrogen amounting to 500 billion cubic metres is produced each year by the chemical and petrochemical industries. Most of it is used for manufacturing ammonia for the production of artificial fertiliser, but hydrogen is also used for plastics, the hydrogenation of fats, steel production and in the glass and semiconductor industries. Today, hydrogen is almost exclusively produced by reforming natural gas or other hydro-carbons.

At present, the renewable generation of H₂ is gaining increasing importance worldwide – and this is also reflected in the research at the two ZSW sites in Stuttgart and Ulm. H₂ is the synonym for a sustainable energy supply that is largely based – and will in the future be entirely based – on renewable energy sources. The research in the electrolysis, Power-to-Gas P₂G[®] and fuel cell fields is one of the most important focus areas at ZSW – and the bridge between all these technologies is hydrogen.

// Economic impetus

Hydrogen can be used as an energy carrier in many ways: as a fuel for fuel cell vehicles or for feeding into the natural gas grid combined with the subsequent generation of electricity and heat using gas turbines, combustion engines and fuel cells. In complete contrast to the currently separate systems for supplying electricity and fuel, hydrogen enables the different business and industry sectors to be linked with one another: automotive manufacturers, the petroleum industry (that will increasingly offer hydrogen at their refuelling stations), electricity and gas producers, the chemical industry and even private households will become part of the H₂ infrastructure in the energy system of the future. In particular the automotive industry has a chance to utilise hydrogen to considerably increase the proportion of fuel from renewable energy sources.

This also produces new impetus for the economy, as has been shown by a ZSW study from last year: by 2030, annual turnovers amounting to 4.5 billion euros are possible in Baden-Württemberg



stoffzellen jährliche Umsätze von bis zu 4,5 Mrd. Euro allein in Baden-Württemberg möglich. Dadurch können 20.000 neue Arbeitsplätze geschaffen werden. Diese Potenziale könnten bis zum Jahr 2050 auf bis zu 25 Mrd. Euro Umsatz und 100.000 Beschäftigte anwachsen.

alone for all hydrogen and fuel cell market segments. This could create 20,000 new jobs. By 2050, this potential could even grow to a turnover of 25 billion euros and 100,000 jobs.



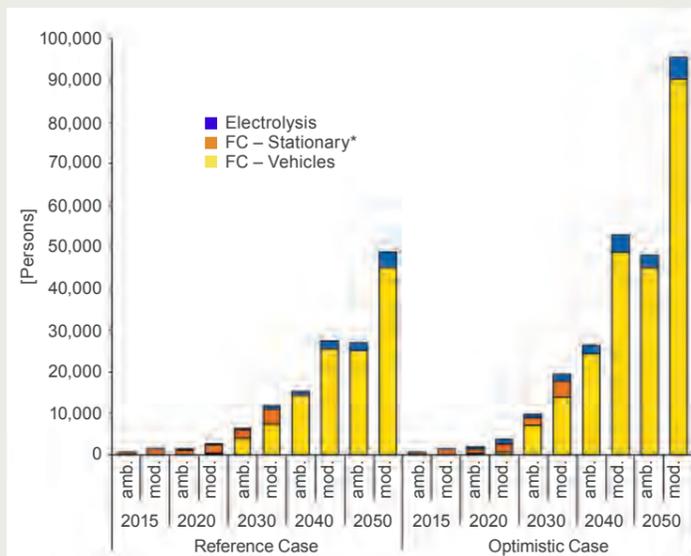
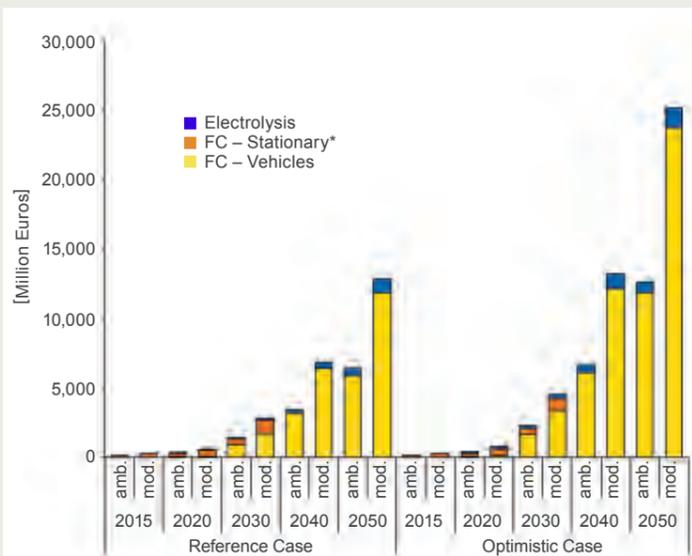
// Focus

// Die Energiewende und der Ausbau fluktuierender Energiequellen

Unser künftiges Energiesystem muss sich zu 100 % auf erneuerbare Energien stützen. Dieses Ziel betrifft nicht nur die Stromversorgung, sondern auch Wärme und Kraftstoffe. Gleichzeitig soll Energie jederzeit ohne Einschränkungen verfügbar sein. Dazu werden vor allem die Photovoltaik und die Windkraft ausgebaut, wobei beide Energien stark fluktuierend anfallen. Der Ausbau der Netze allein kann diese Fluktuation nicht kompensieren. Überschüssige Energie aus Sonne und Wind muss sich speichern lassen, um auch zu Zeiten mit einem geringen regenerativen Angebot die Nachfrage decken zu können. Verschiedene Speicherverfahren befinden sich in der Entwicklung oder werden bereits angewendet, wie beispielsweise Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicher oder Batterien. Ein täglicher Ausgleich, z. B. für Photovoltaikspitzen, ist mit diesen Technologien machbar; jedoch haben sie entweder nicht die nötige Speicherkapazität oder nicht die notwendige Verfügbarkeit, um längerfristige Überschüsse oder Erzeugungsdefizite, vor allem der Windkraft, auszugleichen. So beträgt die derzeit durch Pumpspeicherkraftwerke vorhandene Speicherkapazität in Deutschland 0,04 TWh. Der zukünftige Speicherbedarf bei einer zu 100 % erneuerbaren Stromversorgung wird indes auf einen zweistelligen TWh-Bereich geschätzt.

// The energy turnaround and the development of fluctuating energy sources

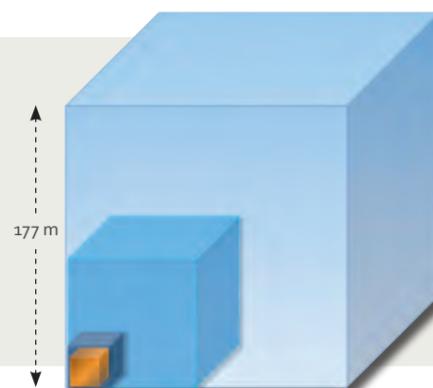
Our future energy system must be entirely based on renewable energy sources. This goal relates not only to the electricity supply but also to heating and fuels. At the same time, energy should be available at all times and without limitations. For this purpose, photovoltaics and wind energy are in particular being expanded, whereby both forms of energy fluctuate by considerable amounts. The expansion of the grids is not enough in itself to compensate this fluctuation. It must be possible to store surplus solar and wind energy to supply electricity during periods when there is little renewable energy available. Various storage methods are therefore either currently under development or are already being used, such as pumped storage plants, compressed air reservoirs and batteries. While daily balancing is feasible with these technologies, for example to cover peaks from photovoltaic sources, they have either insufficient storage capacity or a lack of availability to compensate for longer-term surpluses or generation deficits, in particular from wind energy. The storage capacity provided by pumped storage plants in Germany currently amounts to 0.04 TWh. However, the future storage requirement with up to 100% renewable electricity supply is now estimated to be in the double-figure TWh range.



// Umsatz- und Beschäftigungspotenzial für Baden-Württemberg in allen betrachteten Bereichen. Eigene Berechnungen. * Für stationäre Brennstoffzellen wurde nur das Mittelfrist-Potenzial abgeschätzt. // Turnover and employment potential for Baden-Württemberg in all areas considered. Own calculations. * Only the medium-term potential was estimated for stationary fuel cells.

Somit bewegen sich die Potenziale langfristig in ähnlichen Größenordnungen, wie sie die Schlüsselbranchen des Landes „Maschinenbau“ und „Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen“ bereits heute aufweisen.

The long-term potential therefore has a similar order of magnitude as the federal state's key industries such as mechanical engineering and the automotive and automotive parts industries.



// Um eine Terawattstunde Energie zu speichern, benötigt man Storing one TWh of energy requires:

- 5,5 Millionen Kubikmeter Wasser in einem Pumpspeicherkraftwerk mit einer Höhendifferenz von 83 m
- 0,5 Millionen Kubikmeter Luft in einem Druckluftspeicher bei ca. 50 bar
- 0,017 Millionen Kubikmeter Wasserstoff bei ca. 50 bar
- 0,006 Millionen Kubikmeter Erdgas bei ca. 50 bar

// Focus



Batterien sind gute Kurzzeitspeicher, aber lediglich chemische Energieträger wie Wasserstoff oder Methan – hergestellt im Power-to-Gas (P2G®)-Verfahren aus erneuerbarem Strom – erfüllen die Anforderungen der Langfristspeicherung, die die Energiewende an unser zukünftiges Energiesystem stellt. Zudem kann die Elektrolyse als regelbare Last einen bedeutenden Beitrag zu stabilen Stromnetzen und sicherer Energieversorgung erbringen. Die Vorteile chemischer Energieträger beschränken sich jedoch nicht auf die Fähigkeit, Sonne und Wind speicherbar und bei Bedarf wieder verfügbar zu machen. Mit ihnen lassen sich sowohl nachhaltige Wärme als auch regenerative Kraftstoffe für die Mobilität der Zukunft erzeugen. Häufig wird der schlechte Wirkungsgrad der Wasserstoffspeicherung kritisiert. Beim Betrachten aller Kriterien wie Verfügbarkeit, Kosten und Breite der Anwendungsmöglichkeiten zeigt sich aber sehr schnell, dass chemische Energieträger – allen voran erneuerbarer Wasserstoff – zum Gelingen vieler Facetten der Energiewende beitragen werden.

// Altes Verfahren, neue Perspektiven: die Wasserelektrolyse

Wasserstoff durch elektrochemische Zersetzung von Wasser wurde 1929 erstmals industriell im norwegischen Rjukan erzeugt. Der Strom kam aus einem Wasserkraftwerk. Großtechnisch wurde die H₂-Erzeugung bislang stets dort angewandt, wo regelmäßig zu viel Elektrizität anfällt. Mit dem Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien, insbesondere der Windkraft, ermöglichen moderne Elektrolyseure die Umwandlung von Strom in den einfach speicherbaren und vielseitig nutzbaren Energieträger Wasserstoff.

Heute stehen drei Wasserelektrolysetechnologien mit unterschiedlichem Entwicklungsstand zur Verfügung: die alkalische Wasserelektrolyse (AEL; alkalische Elektrolyse) mit dem am weitesten entwickelten technischen Stand, die Proton-Exchange-

Batteries provide good short-term storage systems. However, only chemical energy carriers such as hydrogen or methane – produced from renewable electricity in the P2G® Power-to-Gas process – meet the long-term storage requirements needed for the energy turnaround as part of our future energy system. Electrolysis as a controllable load, can make an important contribution to ensuring stable electricity grids and securing energy supply. The advantages of chemical energy carriers are, however, not just limited to their ability to store solar and wind energy and make it available as required. They can also be used to generate sustainable heat and renewable fuels for future mobility. The poor efficiency of hydrogen storage is often criticised. However, when considering all criteria such as the availability, cost and scope of the application possibilities, it very quickly becomes apparent that chemical energy carriers – in particular renewable hydrogen – will contribute to the success of many facets of the energy turnaround.

// Old process, new prospects: water electrolysis

Hydrogen created by the electrochemical decomposition of water was first produced on an industrial scale in Rjukan in Norway in 1929. The electricity came from a hydroelectric power station. Until now, the large-scale production of H₂ has always occurred in places where too much electricity is regularly available. With the expansion of fluctuating renewable energy sources, in particular wind power, modern electrolyzers enable electricity to be converted into hydrogen, which, as an energy carrier, is easily storable and can be used in diverse ways.

Today, three technologies to electrolyse water at different stages of development are available: alkaline water electrolysis (AEL), which is the most advanced in terms of technology, proton exchange membrane electrolysis (PEM electrolysis), which is

// Das ZSW hat den Bau der 6-MW-Elektrolyse in Werlitz wissenschaftlich unterstützt.
// ZSW has provided scientific support for the construction of the 6-MW electrolyser in Werlitz.



Membrane-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse), die sich für den industriellen Maßstab derzeit im Entwicklungsstadium befindet, und die Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse (SOEL; engl.: Solid Oxide Electrolysis), die sich noch im frühen Forschungsstadium befindet.

// Alkalische Elektrolyse (AEL)

Die alkalische Wasserelektrolyse ist seit mehr als 80 Jahren industriell verfügbar. Die Elektroden bestehen aus strukturierten Nickelblechen, -geweben oder -vliesen, die mit Katalysatoren aus Raney-Nickel oder Mischoxiden (nur Kathode) beschichtet sind. Die Elektroden werden durch ein poröses Diaphragma aus Nickeloxid oder Zirkonoxid/Kunststoff-Komposit-Membranen getrennt. Die Zellen werden typischerweise von heißer (60–90 °C), 30 %iger Kalilauge durchströmt. Der Betriebsdruck liegt bei vielen Anlagen bei etwa 30 bar. Der Energieverbrauch bewegt sich im Bereich zwischen 4,5 und 5 kWh pro erzeugtem Nm³ Wasserstoff; das entspricht einem Wirkungsgrad von 60–67% (bezogen auf den unteren Heizwert). Alkalische Elektrolyseure sind im Leistungsbereich von wenigen Kilowatt bis zu einigen Megawatt elektrischer Leistung verfügbar. Technologische Herausforderungen sind der Umgang mit dem sehr korrosiven Elektrolyten und besonders im Teillastbereich die Trennung der Produktgase und im Teillastbetrieb Leckageströme beim Abschalten.

// Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse PEM

Die sogenannte PEM-Elektrolyse wird noch nicht großtechnisch eingesetzt, ist aber als kommerzielles Produkt mit bis zu 100 kW Leistung verfügbar und kann ebenfalls in einem weiten Bereich von Umgebungsdruck bis über 100 bar betrieben werden. Bei dieser Elektrolyseart bestehen die Elektroden aus edelmetallbeschichteten, porösen Titanstrukturen (Gewebe, Vliese). Die Elektroden werden durch eine protonenleitende Membran getrennt, die gleichzeitig als Elektrolyt dient. Der wesentliche Vorteil dieser Elektrolyseart gegenüber der alkalischen Elektrolyse ist der Wegfall des Laugenkreislaufs. Statt mit der hochkorrosiven Kalilauge wird hier mit einem einfachen Wasserkreislauf gearbeitet. Damit in Zusammenhang steht auch das bessere Teillast- und Abschaltverhalten (Gasqualität, Leckageströme). Die Herausforderungen für die Technologie liegen in den teuren Zellmaterialien (Titan) und Katalysatoren (Iridium).

currently being developed up to an industrial scale, and high-temperature solid oxide electrolysis (SOEL), which is currently at an early research stage.

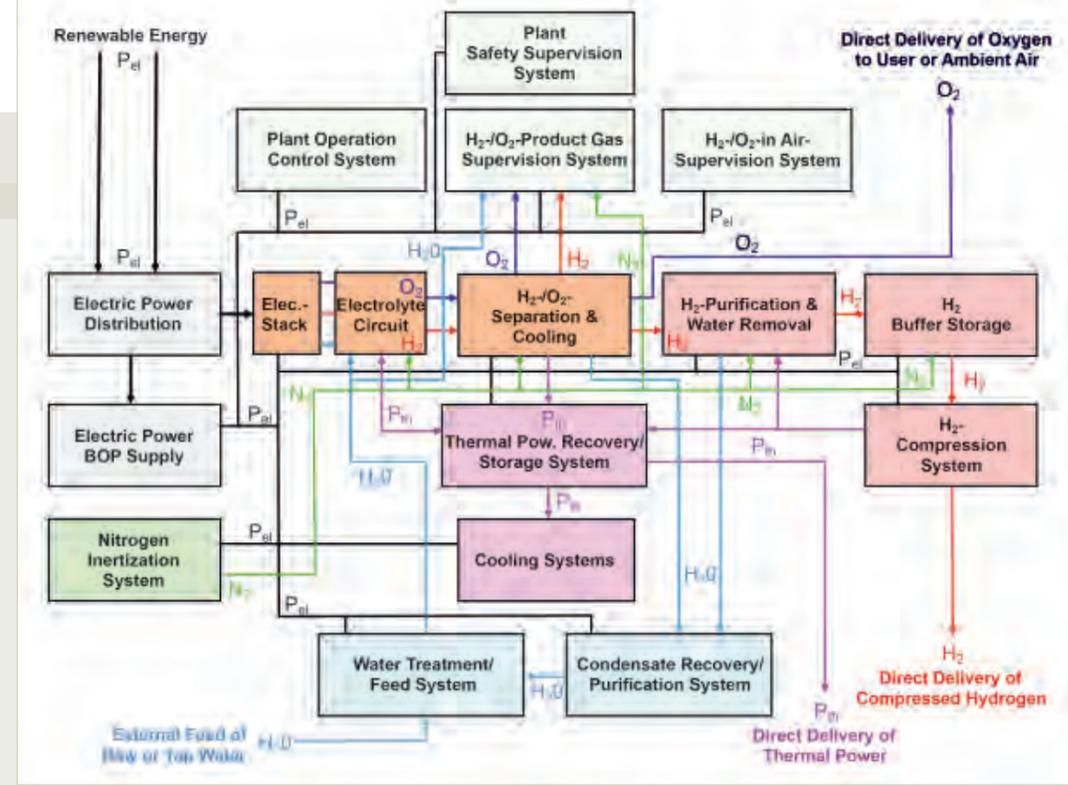
// Alkaline electrolysis (AEL)

Alkaline water electrolysis has been industrially available for more than 80 years. The electrodes consist of textured nickel sheets, fabrics or fleeces that are coated with catalysts made of Raney nickel or mixed oxides (cathode only). The electrodes are separated by a porous diaphragm made of nickel oxide or zirconium oxide/plastic composite membranes. A hot (60–90 °C) potassium hydroxide solution (30%) typically flows through the cells. The operating pressure for many plants is about 30 bar. The energy consumed ranges between 4.5 and 5 kWh for each Nm³ of hydrogen generated; this corresponds to an efficiency of 60–67% (related to the lower heating value). Alkaline electrolyzers are available at capacities ranging from just a few kilowatts to several megawatts of electrical power. Technical challenges include dealing with the very corrosive electrolytes and, particularly in the partial load area, the separation of the product gases and, during partial load operation, the shunt currents flows when switching off.

// Proton exchange membrane electrolysis (PEM)

Although PEM electrolysis is not yet being used on a large scale, it is already available as a commercial product with a capacity of up to 100 kW and can also be operated in a wide range from ambient pressures up to over 100 bar. With this type of electrolysis, the electrodes consist of porous titanium structures (cloth and fleece), which are coated with precious metal. The electrodes are separated by a proton-conducting membrane that also acts as the electrolyte. The main advantage of this kind of electrolyte compared to alkaline electrolysis is that it eliminates the need for a potassium hydroxide circuit. Instead of using highly corrosive potassium hydroxide, a simple water circuit is used. This also improves the partial load and switching-off behaviour (gas quality and shunt currents). The challenges posed by this technology relate to the expensive cell materials (titanium) and catalysts (iridium).

// Focus



// Prozessschema einer modularen P2G-Elektrolyse.
// Process schematic for modular P2G electrolysis.

// Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse (SOEL)

Bei dieser Elektrolysetechnologie werden auf eine Sauerstoff-Ionen-leitende Keramik (Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid) dünne, poröse Elektrodenschichten (Nickel-Keramik-Cermets) als Kathode und Mischoxide als Anode aufgebracht. Die Betriebstemperaturen liegen im Bereich zwischen 600 und 1.000 °C. Die Technologie wurde bislang mit Leistungen zwischen wenigen Watt und einigen Kilowatt sowohl in planaren als auch tubularen Zellaufbaukonzepten demonstriert. Großer Vorteil ist die sehr geringe Zellspannung (zwischen 1,0 und 1,4 V im Vergleich zu den etwa 2 V der Niedertemperaturtechnologien) und damit verbunden der sehr hohe Wirkungsgrad. Wenn es gelingt, überschüssige Wärme aus Hochtemperaturprozessen (z. B. solarthermische Anlagen) einzukoppeln, kann diese Technologie mit einem nahezu 100%igen Wirkungsgrad (elektrisch) Wasserstoff erzeugen. Die große Herausforderung ist die Entwicklung von kostengünstigen Zellen im industriellen Maßstab mit den entsprechenden keramischen Bauteilen.

// ZSW-Elektrolyse-Projekte

Das ZSW erforscht die Technologie der elektrochemischen Wasserstoffherzeugung umfassend: von der Entwicklung neuer Aktivmaterialien bis zum Bau und Betrieb entsprechender Forschungs- und Demonstrationsanlagen. Zu den Forschungsgegenständen zählen atmosphärische und Druckelektrolyseure. Zudem wird an der alkalischen Wasserelektrolyse und an Polymerelektrolytmembran-Elektrolysesystemen geforscht.

Ein technologisch neuer Ansatz ist die Verwendung von Anionenaustauscher-Membranen für die Elektrolyse. Damit könnten sowohl die teuren Edelmetallkatalysatoren der PEM-Elektrolyse vermieden werden als auch der kritische Kalilauge-Kreislauf der AEL-Technologie. Im Rahmen eines Förderprojektes wurden verfügbare Anionenaustauscher-Membranen in ZSW-Testzellen eingebaut und charakterisiert.

// High-temperature solid oxide electrolysis (SOEL)

With this electrolysis technology, oxygen ion-conducting ceramic material (yttria-stabilised zirconia) is coated with thin, porous electrode layers (nickel ceramic cermets) to form the cathode, and mixed oxide to form the anode. The operating temperature ranges between 600 and 1000 °C. The technology has so far been demonstrated with capacities between just a few watts and several kilowatts, and both in planar and tubular cell structure concepts. The major advantage is the very low cell voltage (between 1.0 and 1.4 volts compared with the roughly 2 volts for low-temperature technologies) and the associated very high efficiency. If surplus heat can be integrated from high-temperature processes (e.g. solar thermal systems), this technology will be able to generate hydrogen with almost 100% (electrical) efficiency. The major challenge will be to develop cost-effective cells on an industrial scale with the corresponding ceramic components.

// ZSW electrolysis projects

ZSW is comprehensively researching the technology for electrochemical generation of hydrogen: from the development of new active materials to the design and operation of the corresponding research and demonstration plants. The research subject areas include atmospheric and pressure electrolyzers. In addition, research is being conducted on alkaline water electrolysis and polymer electrolyte membrane electrolysis systems.

A new technological approach is the use of anion exchange membranes in electrolysis. This could eliminate both the use of expensive precious metal catalysts in PEM electrolysis as well as the critical potassium hydroxide circuit used in AEL technology. As part of a funded project, existing anion exchange membranes were installed in ZSW test cells and characterised.

In einem weiteren Projekt wird derzeit das Know-how zu porösen Strukturen aus der Brennstoffzellenforschung auf poröse Nickelstrukturen für die AEL-Technologie übertragen. Ziel ist es, optimierte Elektroden zu entwickeln, die eine deutlich niedrigere Zellspannung und damit einen deutlich höheren Wirkungsgrad bei der Wasserstoffherzeugung ermöglichen.

Ende 2012 wurde das Verbundprojekt „P2G-Elektrolyse – Entwicklungsarbeiten zur alkalischen Druckelektrolyse zwecks Umwandlung erneuerbaren Stroms in Wasserstoff“ im Rahmen der gemeinsamen Förderinitiative „Energiespeicher“ der Bundesministerien für Wirtschaft, für Umwelt und für Forschung genehmigt. Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung und Erprobung eines kostenoptimierten Prototyps basierend auf AEL-Technologie in der 300-kW_{el}-Klasse. Dabei werden die für die Gesamtanlage technisch notwendigen Entwicklungspotenziale ausgeschöpft und die Hochskalierung in die untere Megawattklasse vorbereitet. Des Weiteren sollen auf Grundlage einer Analyse der Kostenstruktur und Wertschöpfungskette innovative Anlagenbau- und Fertigungskonzepte entwickelt werden. Im Aufbau befindet sich außerdem ein Prüfstand, der Herstellern umfangreiche Testmöglichkeiten für komplette Elektrolyseblöcke, aber auch einzelne Komponenten bieten wird.

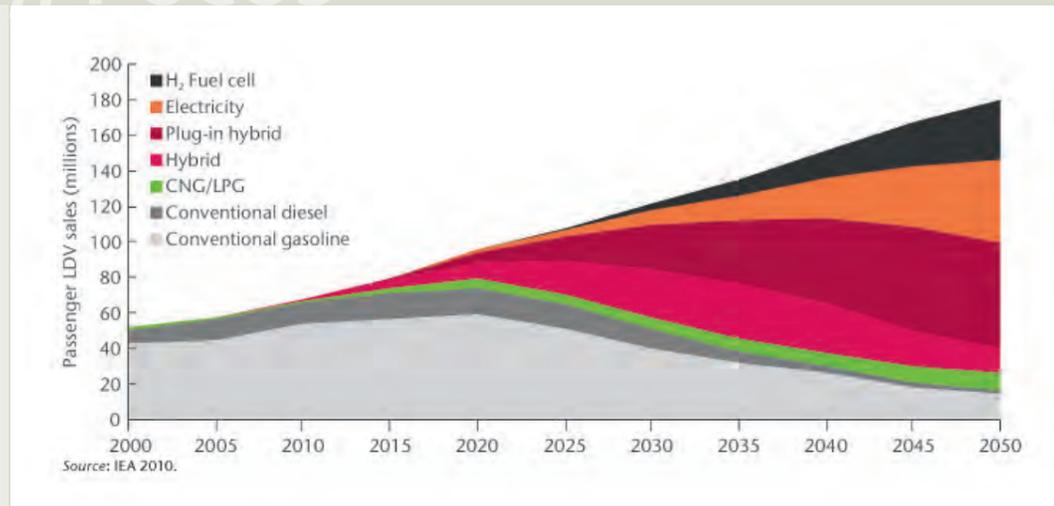
Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes „Power-to-Gas 250“ betreibt das ZSW bereits seit Herbst 2012 eine alkalische Druckelektrolyse mit einer elektrischen Anschlussleistung von 250 kW_{el}. Sie zeichnet sich durch ihre dynamische und intermittierende Betriebsweise aus, sodass sie flexibel auf ein rasch wechselndes Stromangebot aus Wind und Sonne sowie auf plötzliche Unterbrechungen reagieren kann. Das ist zugleich eine Bedingung künftiger Energiesysteme mit einem hohen Anteil erneuerbaren Stroms aus fluktuierenden Quellen.

In a further project, the knowledge about porous structures gained from fuel cell research is currently being transferred to porous nickel structures for AEL technology. The aim is to develop optimised electrodes that enable considerably lower cell voltages and thus considerably greater efficiency when generating hydrogen.

At the end of 2012, the joint project entitled “P2G electrolysis – development work on alkaline pressure electrolysis for the purpose of converting renewable electricity into hydrogen” was approved as part of the joint “Energy Storage” initiative funded by Germany’s Federal Ministries for Economy, Environment and Research. The aim of the project is to develop and test a cost-optimised prototype based on AEL technology in the 300-kW_{el} class. Here the technically necessary development potential for the entire system will be exploited, and scaling up to the lower megawatt class will be prepared. In addition, innovative plant construction and production concepts will also be developed based on an analysis of the cost structure and value added chain. A test rig is also being constructed that will provide manufacturers with comprehensive testing possibilities not just for entire electrolysis blocks but also for individual components.

As part of the “Power to Gas 250” project funded by the German Federal Ministry for the Environment, ZSW has already been operating an alkaline pressure electrolyser with a connected electrical load of 250 kW_{el} since autumn 2012. The electrolyser is distinguished by its dynamic and intermittent mode of operation, enabling flexible respond not just to fluctuating solar and wind energy supplies but also to sudden interruptions. This is also a requirement for future energy systems with a high proportion of renewable electricity from fluctuating sources.

// Focus



// Jährlicher Absatz an leichten Nutzfahrzeugen und Pkw aufgeteilt nach Antriebstechnologien (Blue Map Szenario).
// Annual light-duty vehicle sales by technology type, Blue Map scenario.



// Brennstoffzellen-Fahrzeug im Einsatz.
// Fuel cell car on the road.

// Wasserstoff – Energieträger der Zukunft

Gegenstand weltweiter Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff im Verkehrssektor. Hierzu gehört sowohl die Entwicklung von Brennstoffzellenantrieben als auch der Aufbau einer Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur. Wasserstoff kann auch bis zu einem gewissen Prozentsatz in das Erdgasnetz eingespeist und anschließend dem klassischen Strom- und Wärmemarkt zugeführt werden. Sind geeignete CO₂-Quellen (z. B. Biogasanlagen) vorhanden, dann bietet sich auch die Umwandlung von Wasserstoff und CO₂ in Methan an, das dann als Kraftstoff oder für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden kann.

// Wasserstoff für die Mobilität von morgen

Fast unsere komplette Mobilität basiert auf fossilen Kraftstoffen. Die Wachstumsprognosen weltweit sind weiterhin enorm. Bereits heute befahren mehr als eine Milliarde Fahrzeuge die Straßen der Welt. Gleichzeitig ist bekannt, dass die fossilen Energiequellen begrenzt sind und das Fördermaximum bei konventionellem Öl überschritten ist (Peak Oil). Öl muss immer aufwendiger in der Tiefsee, durch Fracking aus Schiefergesteinen usw. gefördert werden. Damit einher gehen sich verschärfende Umweltgesetzgebungen, die die Automobilhersteller vor weitere große Herausforderungen stellen. Ein Dilemma für die Verbrennungsmotoren ist ein physikalisches Grundprinzip: der Carnot-Prozess und der damit verbundene maximale Wirkungsgrad. So nutzen moderne Motoren für den Antrieb nur etwa 20 % (Ottomotor) bis 25 % (Dieselmotor) der Energie, die im Kraftstoff steckt (über einen typischen Fahrzyklus gerechnet); der Rest endet als heiße Abluft in der Umwelt. Elektroantriebe haben diese Begrenzung nicht: Elektroantriebe mit Strom aus wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen nutzen etwa 50 % der im Tank gespeicherten Energie für die Fortbewegung, bei batterieelektrischen Antrieben sind es sogar etwa 80 %.

// Hydrogen – an energy carrier of the future

A subject of worldwide research and development activities is the use of hydrogen as a fuel in the transport sector. This includes both the development of fuel cell drives as well as the installation of a hydrogen refuelling station infrastructure. A certain percentage of hydrogen can also be fed into the natural gas network and then subsequently added to the traditional electricity and heating market. If suitable CO₂ sources are available (for example, biogas plants), it is also possible to convert hydrogen and CO₂ into methane, which can then be used as a fuel or for generating electricity and heat.

// Hydrogen for tomorrow's mobility

Almost all our mobility is based on fossil fuels. The growth forecasts continue to be enormous throughout the world. Today, there are already more than 1 billion vehicles on the world's roads. At the same time, it is known that fossil fuels are limited and that the production maximum for conventional oil has already been exceeded (peak oil). Oil has to be increasingly produced from deep sea or by fracking shales. In addition, stricter environmental legislations are challenging automotive manufacturers. A dilemma for combustion engines is a physical principle: the Carnot cycle and the associated maximum efficiency. Modern engines use only between 20% (Otto engine) to 25% (diesel engine) of the energy contained in the fuel for propulsion (when calculated across a typical driving cycle). The rest ends up as hot exhaust air that is emitted to the environment. Electric motors do not have this limitation. Electric motors using electricity from hydrogen-operated fuel cells utilise about 50% of the energy stored in the tank for the propulsion while battery-powered drives even utilise about 80%.

// Wann sind Brennstoffzellen-Antriebe verfügbar?

Die meisten Automobilhersteller weltweit entwickeln seit vielen Jahren Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Auf Millionen von Kilometern haben diese Fahrzeuge inzwischen ihre Alltagstauglichkeit bewiesen. Sie zeichnen sich durch kurze Betankungszeiten, hohe Reichweiten und exzellenten Fahrkomfort aus und brauchen somit den Vergleich zu heutigen Antriebstechnologien nicht zu scheuen. Hyundai hat als erster Hersteller die kommerzielle Vermarktung begonnen. Ab 2015 werden Honda und Toyota folgen. Daimler wird in Kooperation mit Ford und Nissan im Jahr 2017 ca. 100.000 Fahrzeuge auf die Straße bringen.

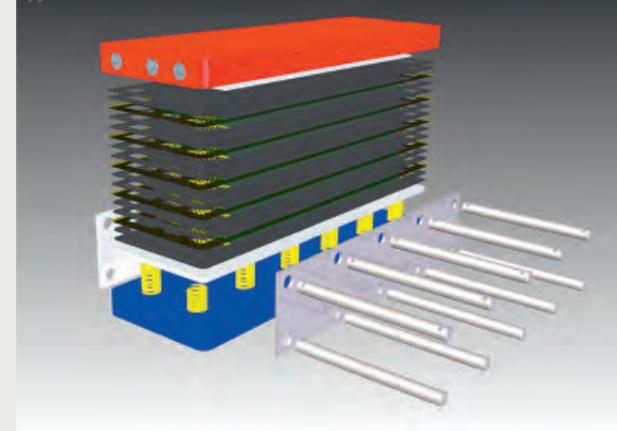
Auf dem Weg zur Kommerzialisierung europäischer Brennstoffzellen-Fahrzeuge ist der Aufbau einer durchgängigen und wettbewerbsfähigen Zulieferindustrie entscheidend. Noch ist Asien einen Schritt voraus. Für das Automobilland Deutschland geht es jetzt darum, rechtzeitig marktfähige Brennstoffzellen für Fahr-

// When will fuel cell engine become available?

Most of the world's automotive manufacturers have been developing fuel cell vehicles for many years. These vehicles have now proved their suitability for everyday use across millions of kilometres. They feature short refuelling times, high range and excellent driving comfort, and can therefore easily stand comparison with the current engine technologies. Hyundai is the first manufacturer to have started commercial marketing of the vehicles. It is being followed by Honda and Toyota in 2015. In cooperation with Ford and Nissan, Daimler is planning to launch approx. 100,000 vehicles on the roads in 2017.

On the path to commercialising European fuel cell vehicles, the development of a continuous and competitive supply industry is decisive. Asia is still one step ahead in this regard. For Germany, as an automotive country, it is now important to provide market-ready fuel cells for vehicles in good time and thereby position itself in

// Auto-Stack-Tool



// ZSW-Entwicklungsplattform für Hochleistungsbrennstoffzellen
Das ZSW kann eine 25-jährige Expertise bei der Entwicklung von Brennstoffzellen vorweisen sowie eine hervorragende technische Ausstattung mit allen notwendigen Entwicklungswerkzeugen für die Optimierung von Komponenten, Zellen und Stacks. So steht am Standort Ulm beispielsweise seit 2012 das Werkzeug „Auto-Stack-Tool“ mit dazugehörigem Prüfstand zur Verfügung. Dieses Tool dient der Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten und der Entwicklung von Hochleistungs-Brennstoffzellen unter fahrzeugtypischen Bedingungen. Das Werkzeug kann flexibel an kundenspezifische Anforderungen angepasst und bildet damit eine Technologiebasis für die Industrialisierung von fahrzeugtauglichen Brennstoffzellen in Deutschland.

// ZSW development platform for high-performance fuel cells
ZSW can boast 25 years of expertise in the development of fuel cells as well as excellent technical facilities with all the necessary development tools for optimising components, cells and stacks. For instance, the "Auto Stack Tool" including its test stand, has been available at the Ulm site since 2012. This tool is used for characterising fuel cell components and developing high-performance fuel cells under vehicle-typical conditions. The tool can be flexibly adapted to meet customer-specific requirements and thus provides a technological basis for the industrialisation of vehicle-suitable fuel cells in Germany.

// Focus



zeuge anbieten und sich in dem zukunftsrichtigen Thema Brennstoffzellenantriebe am Weltmarkt zu positionieren. Um all die notwendigen Technologiekompetenzen durchgängig aufzubauen, gilt es, Know-how aus Forschung und Industrie zu bündeln.

Für die erfolgreiche Etablierung neuer Brennstoffzellen-Systeme und entsprechender Lieferanten am Markt sollen Hochleistungsbrennstoffzellen eine ganze Reihe wichtiger Eigenschaften erfüllen – von der extremen Leistungsdichte über gute Kaltstarteigenschaften bis zu hoher Lebensdauer bei hochdynamischem Betrieb. Dafür müssen einzelne kostengünstige Bauteile aufeinander abgestimmt und in ihrer Funktion optimiert werden. Beispielsweise ist es erforderlich, Hochleistungsbrennstoffzellen und Brennstoffzellen-Komponenten in einer prozesssicheren Umgebung vorzuqualifizieren und zu testen. Dazu gehören herstellerneutrale Tests mit fahrzeugtauglicher Leistungscharakteristik, um die Qualität der Komponenten nachzuweisen oder Entwicklungszyklen zu verkürzen. Ein weiterer Aspekt sind unabhängige Leistungs- und Lebensdauertests in Realdesign und unter realen Bedingungen für standardisierte, anonymisierte Produktvergleiche. Des Weiteren müssen optimale Betriebsbedingungen für Komponenten herausgefunden sowie Kanalgeometrien oder mechanische Eigenschaften der Gasdiffusionslagen angepasst werden, um die geforderten Leistungsdaten zu erreichen. Besonders mittelständischen Unternehmen fehlen oft eigene Ressourcen, um innovative Konzepte für Komponenten, deren Herstellprozesse und Qualitätssicherungsmaßnahmen zu erproben.

// Infrastruktur von Wasserstofftankstellen

Die größte Hürde für Brennstoffzellen-Fahrzeuge ist der Aufbau eines flächendeckenden Wasserstofftankstellennetzes. Die Bundesregierung hat im Jahr 2009 hierzu in ihrer Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie unter dem Motto „Weg vom Öl“ beschlossen, den Aufbau der notwendigen Infrastruktur zu unterstützen. Dies geht einher mit der Strategie der europäischen Kommission „Clean Power for Transport: A European Alternative Fuels Strategy“. Demnach soll EU-weit bis 2020 alle 300 km eine Wasserstofftankstelle zur Verfügung stehen. In diesem Kontext hat sich die beteiligte Industrie zusammengeschlossen und plant, bis 2023 insgesamt 400 Wasserstofftankstellen allein in Deutschland zu errichten (H₂-Mobility).

the global market for the promising fuel cell engine segment. In order to continuously develop all the necessary technological expertise it is important to bundle the know-how from research and industry.

In order to establish new fuel cell systems and the corresponding suppliers in the market, high-performance fuel cells must fulfil a whole set of important criteria, ranging from extreme power density and good cold start properties to a long service life with highly dynamic operation. For this purpose, cost-effective components must be matched with one another and optimised in terms of their function. For example, it is necessary to pre-qualify and test high-performance fuel cells and fuel cell components in a reliable environment. This includes manufacturer-neutral tests with vehicle-suitable performance characteristics in order to verify the quality of the components or shorten development cycles. Independent performance and service life tests using real designs and under real conditions for standardised, anonymous product comparisons are a further aspect. In addition, optimum operating conditions for components must be determined and the channel geometries and mechanical properties of the gas diffusion layers adapted in order to achieve the required performance data. Particularly medium-sized companies often lack the resources to test out innovative concepts for their components, production processes and quality assurance measures.

// Infrastructure for hydrogen refuelling stations

The greatest hurdle for fuel cell vehicles is the development of a comprehensive H₂ refuelling station network. Under the maxim “Away from oil”, the German federal government therefore decided in 2009 to support the development of the necessary infrastructure as part of its mobility and fuel strategy. This complements the European Commission strategy entitled “Clean Power for Transport: A European Alternative Fuels Strategy”. The strategy aims to provide hydrogen refuelling stations every 300 kilometres in the EU by 2020. In this context, the industries concerned have combined forces and are planning to construct a total of 400 hydrogen refuelling stations in Germany alone by 2023 (H₂ Mobility project).



// P₂G® – eine ZSW-Technologie auf der Erfolgsspur

Mit dem sogenannten Power-to-Gas-Verfahren kann Wasserstoff und bei Bedarf Methan hergestellt werden. Die einzelnen Schritte von Power-to-Gas (P₂G®)-Elektrolyse und Methanisierung sind zwar bekannt – neu ist, neben zahlreichen Effizienzsteigerungen bei der Anwendung, die Kombination dieser beiden Prozesse. Erneuerbares Methan, hergestellt aus Wind- und Sonnenenergie, ist von seiner Zusammensetzung her nichts anderes als Erdgas und kann dementsprechend in das gut ausgebaute Erdgasnetz eingespeist und effizient gespeichert werden. Zur vorhandenen Erdgas-Infrastruktur zählen neben den eigentlichen Leitungen Gastanks und unterirdische Kavernen. All diese Speichermöglichkeiten stehen bereits zur Verfügung und bieten mit mehr als 200 TWh immense Kapazitäten. Sowohl Methan als auch in bestimmten Mengen Wasserstoff können darin aufgenommen, verteilt und zur bedarfsgerechten Nutzung bereitgestellt werden. Die Gase können zudem mehrere Monate verlustfrei in den genannten Möglichkeiten gespeichert werden. So bietet der P₂G®-Prozess die Option auf ein Zusammenwachsen von Stromnetz und Gasnetz zu einem integrierten Gesamtsystem.

Als CO₂-Quelle für den Methanisierungsprozess kommen beispielsweise Biogasanlagen, Anlagen zur Bioethanolproduktion, Kraftwerksprozesse und die chemische Industrie infrage. Der Zugang zu weiteren CO₂-Quellen ist weiterhin Gegenstand aktueller Forschungen am ZSW. Das synthetische Erdgas kann bei Bedarf in modernen Gas- und Dampfkraftwerken oder in dezentralen Blockheizkraftwerken zurückverstromt werden, in der Industrie zum Einsatz kommen oder aber als Kraftstoff, z. B. für Erdgasautos, Verwendung finden. Gerade letztgenannte Option kann eine entscheidende Lösung bei der Energiewende im Verkehrssektor bieten, zumal die Antriebstechnik von Erdgasautos bereits ausgereifter als die

// P₂G® – a ZSW technology on route to success

The so-called Power-to-Gas process makes it possible to produce hydrogen and, if required, methane. While the individual steps in Power-to-Gas P₂G® electrolysis and methanisation have been known for a long time, new aspects include not just the numerous improvements in efficiency during implementation but also the combination of these two processes. In terms of its composition, renewable methane produced from wind and solar energy is nothing other than natural gas and can accordingly be fed into the well-developed natural gas grid and efficiently stored there. The existing natural gas infrastructure includes the existing pipelines, gas tanks and underground caverns. All these storage alternatives already exist and offer immense capacities exceeding 200 TWh. Both methane and, to a limited extent, hydrogen can be integrated, distributed and made available for use in accordance to the demand. The gases can also be stored in the alternative locations mentioned above for several months without any losses. The P₂G® process makes it possible for the electricity grid and the gas network to grow together to form an integrated overall system.

Possible sources of CO₂ for the methanisation process include biogas plants, bioethanol production plants, power plant processes and the chemical industry. Research on accessing further CO₂ sources is currently being conducted at ZSW. The synthetic natural gas can be used for generating electricity in modern combined cycle power plants or in decentralised CHP plants, it can be deployed in industry and it can be used as a fuel, for example, in natural gas vehicles. Particularly the latter option could offer a decisive solution for the energy turnaround in the transport sector, especially since the drive technology for natural gas vehicles is already more mature than other environmentally friendly technologies.

// Focus



anderer umweltfreundlicher Techniken ist. Auch das Tankstellennetz für CNG (Compressed Natural Gas) ist verhältnismäßig gut ausgebaut. Das Engagement eines Automobilherstellers, der mit wissenschaftlicher Unterstützung des ZSW die erste industrielle P2G®-Anlage (6 MW_{el}) gebaut hat, verdeutlicht das enorme Potenzial. Auch der im P2G®-Prozess erzeugte Wasserstoff kann für die Mobilität von morgen genutzt werden.

Zusammenfassend betrachtet, bildet P2G® auch eine wichtige Basis für das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele im Mobilitätssektor und ermöglicht sowohl eine Kurz- als auch Langstreckenmobilität. Die Erzeugung von Wasserstoff und Methan ist gegenüber flüssigen erneuerbaren synthetischen Energieträgern technologisch einfacher, energetisch effizienter und im Entwicklungsstadium weiter voran. Die Systemlösung P2G® ist darüber hinaus geeignet, Deutschlands technologischen Vorsprung zu sichern sowie die Abhängigkeit von Erdgasimporten – und mit Blick auf den Mobilitätssektor auch die Abhängigkeit von Mineralöl – zu verringern. Die P2G®-Technologie hat bereits den Schritt in die Industrialisierung geschafft. Der Weg dorthin war lang und konsequent. Chemische, wasserstoffbasierte Energieträger – von Methanol mit CO₂-Gewinnung aus der Luft bis hin zu CNG – erforscht das ZSW seit seinem Bestehen. Das Basic Engineering für P2G®-Anlagen und die Anpassung an spezifische Anforderungsprofile bilden dabei einen Schwerpunkt. Im Jahr 2009 hat das ZSW bereits erfolgreich nachgewiesen, dass das P2G®-Konzept einwandfrei funktioniert: anhand einer containerintegrierten 25-kW_{el}-Testanlage. Diese wurde 2011 an verschiedenen Standorten mit verschiedenen CO₂-Quellen betrieben. Im Herbst 2012 nahm das ZSW eine zehnmal leistungsstärkere 250-kW_{el}-Pilotanlage in Betrieb. Die Erfahrungen aus dem dortigen Forschungsbetrieb fließen auch in das Projekt im niedersächsischen Werlte ein (6000 kW_{el}).

The refuelling station network for CNG (compressed natural gas) is also relatively well developed. The enormous potential is demonstrated by the commitment of an automotive manufacturer who, with ZSW's scientific support, has constructed the first industrial-scale P2G® plant (6 MW_{el}). The hydrogen generated in the P2G® process can also be used for future mobility.

Seen as a whole, P2G® also provides an important basis for achieving the sustainability goals in the mobility sector and enables both short and long-distance mobility. Relative to liquid-based, renewable synthetic energy carriers, the generation of hydrogen and methane is technologically easier, more energy efficient and further developed. In addition, the P2G® system solution is also suitable for securing Germany's technological lead as well as reducing its dependence on natural gas imports and, with regard to the mobility sector, its dependence on petroleum. The P2G® technology has already made the step towards industrialisation. The path was long and rigorous. Since it came into existence, ZSW has been researching chemical, hydrogen-based energy carriers, ranging from methanol using CO₂ captured from the air to CNG. The basic engineering for P2G® systems and their adaptation to meet specific requirement profiles have formed one focus area. ZSW already successfully proved in 2009 that the P2G® concept works faultlessly, using a container-integrated 25-kW_{el} test plant. In 2011, this was operated at different locations with different CO₂ sources. In autumn 2012, ZSW began operating a 250-kW_{el} pilot plant with ten times the capacity. The experience gained from the research operation there is now being incorporated in the project in Werlte in Lower Saxony (6000 kW_{el}).

// Effiziente Biomassenutzung durch Elektrolyse-H₂

Unser derzeitiges Energiesystem basiert auf der Nutzung fossiler, kohlenstoffhaltiger Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas. Auch in Zukunft werden weiterhin kohlenstoffhaltige Kraftstoffe (C-Fuels) gebraucht, zumal C-Fuels in verschiedenen Nutzungssektoren kaum zu ersetzen sind. Das betrifft insbesondere den Kraftstoffbedarf für Flugverkehr oder die Lkw-Langstrecke. Die einzige erneuerbare Energie, die Kohlenstoff enthält, ist Biomasse. Daher hat sie – in Verbindung mit regenerativ erzeugtem Elektrolyse-Wasserstoff – das Potenzial, eine Schlüsselrolle bei Energiewende und Klimaschutz zu spielen. Durch fermentative und thermochemische Konversion kann Biomasse in einspeisefähiges Gas umgewandelt werden, das sich über Monate verlustfrei im Erdgasnetz speichern lässt.

Biomasse ist jedoch in vielen Ländern knapp. Mit Elektrolyse-Wasserstoff kann die Effizienz bzw. die Reichweite der Ressource Biomasse bei der Erzeugung von kohlenstoffbasierten Kraftstoffen um den Faktor 2 bis 3 erhöht werden. Im Vergleich zu den heute üblichen Biokraftstoffen entspricht das sogar einem sechsfach höheren Kraftstofftrag. Damit verringert sich der Agrarflächenbedarf drastisch: auf bis zu einem Sechstel.

// Efficient biomass utilisation using electrolysis H₂

Our current energy system is based on the use of carbon-based fossil fuels such as coal, crude oil and natural gas. Carbon-based fuels (C-fuels) will continue to be required in the future, particularly as C-fuels are almost impossible to replace in various market sectors. This applies especially to the fuel required for aviation or long-distance lorries. The only renewable energy source that contains carbon is biomass. In conjunction with renewably generated electrolysis hydrogen, it therefore has the potential to play a key role in the energy turnaround and climate protection. By means of fermentative and thermochemical conversion, biomass can be transformed into feed-in gas that can be stored in the natural gas network for months without loss.

However, there is a shortage of biomass in many countries. Electrolysis hydrogen enables the efficiency and the range of biomass as a resource to be increased by two- to threefold when generating carbon-based fuels. Compared with the currently used biofuels, this even corresponds to a sixfold increase in the fuel yield. This therefore means a dramatic reduction of the need for agricultural land – by up to a sixth.



// Fachgebiete und Projekte
Departments and Research Projects

// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Um den richtigen Weg der Energiewende drehen sich im Jahr 2013 die wesentlichen energiepolitischen Diskussionen in Deutschland. Neben der Frage, ob und wie wir die ehrgeizigen Ausbauziele für die Erneuerbaren erreichen können, rückten die damit verbundenen Kosten und die zukünftig effizientesten Förderinstrumente verstärkt in den Fokus. Darüber hinaus wurden Fragen der Markt- und Systemintegration der erneuerbaren Energien und damit verbunden der zukünftige Bedarf an Energiespeichern in Politik und Wissenschaft debattiert.

Die skizzierten Themen gehören zur Kernkompetenz des interdisziplinär besetzten Fachgebiets Systemanalyse. Wir beschäftigen uns seit dessen Entstehung mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und waren im abgelaufenen Jahr bereits zum vierten Mal mit dessen Evaluierung und Fortentwicklung im Auftrag des Bundesumweltministeriums (BMU) befasst. Mit einem auf das EEG zugeschnittenen Kostenberechnungstool sind wir auch in der Lage, die Kostenwirkungen sowohl des aktuellen EEG als auch alternativer Ausbaupfade belastbar abschätzen zu können. Mit unserem Strommarktmodell können wir Fragen zur zukünftigen Integration der erneuerbaren Energien unter verschiedenen Rahmenbedingungen analysieren und damit auch die Frage beantworten, wann in welchem Umfang Speicher im Energiesystem erforderlich sein werden. Leistungsfähige Vorhersagesysteme für die Einspeisung von Wind- und Photovoltaikstrom runden das Kompetenzprofil ab. Durch die Koordination und Leitung der vom BMU eingerichteten Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik (AGEE-Stat) sind wir zudem seit nunmehr zehn Jahren mit dem Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien in Deutschland betraut.



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

// Our main focus

In 2013, the main discussions surrounding energy policy in Germany were about how to best forge ahead with the energy turnaround. Besides the matter of whether and how we can reach the ambitious expansion targets for renewable energy sources, the associated costs and the most efficient future funding instruments moved into the spotlight. In addition, questions of the market and system integration of renewable energies and the associated future demand for energy storage systems were discussed in politics and science alike.

The topics outlined belong to the core areas of expertise of the interdisciplinary Systems Analysis research department. Since its establishment, we have concerned ourselves with the German Renewable Energy Sources Act (EEG) and last year we were tasked, for the fourth time now, with its evaluation and further development on behalf of the German Federal Ministry for the Environment (BMU). With a cost calculation tool tailored to the EEG, we are able to reliably estimate the cost effects of both the current EEG and of any alternative expansion paths. Our electricity market model enables us to analyse the future integration of renewable energy sources under different framework conditions, thus answering the question of when and to what extent storage systems will be required in the energy system. Sophisticated forecasting systems for the feed-in of wind and photovoltaic power complete our competency profile. By coordinating and heading the Working Group on Renewable Energies – Statistics (AGEE-Stat) set up by the BMU, we have also been entrusted with monitoring the expansion of renewable energies in Germany for 10 years now.

// Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg

Monitoring the energy turnaround in Baden-Württemberg

// Monitoring der Energiewende in Baden-Württemberg

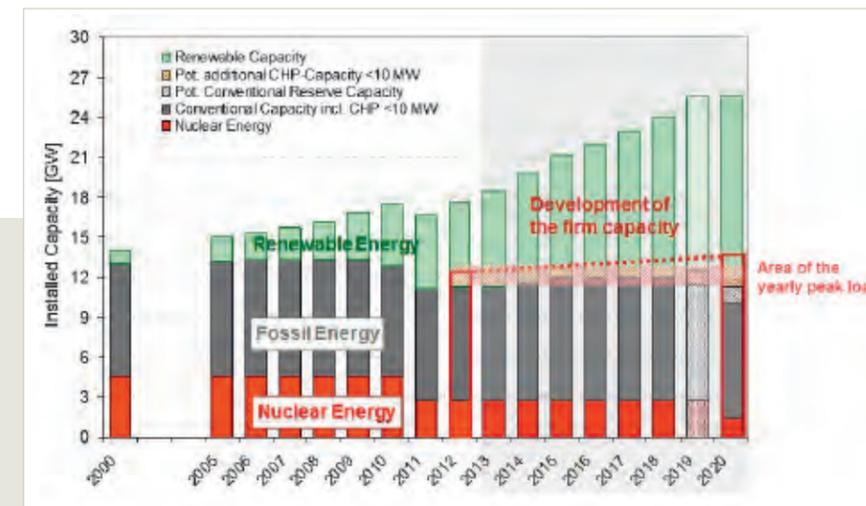
Die Herausforderungen durch die Energiewende sind in Baden-Württemberg besonders groß, da hier bislang die Kernenergie die Stromerzeugung dominierte und nunmehr durch regenerative Energien ersetzt werden muss. Zudem hat sich das Land im Klimaschutzgesetz selbst ambitionierte Ziele gesetzt: Bis 2020 sollen die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 25 % gesenkt werden. Gleichzeitig ist das Versorgungssicherheitsniveau zu halten. Die Komplexität des Transformationsprozesses erfordert die genaue Beobachtung und Bewertung der maßgeblichen Entwicklungen in Energiewirtschaft und -politik. Das Fachgebiet Systemanalyse wurde vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit einem entsprechenden Monitoring im Land beauftragt. Ziel ist es, die Umsetzung und die Auswirkungen der Energiewende zu analysieren, mögliche Fehlentwicklungen zu erkennen und Handlungsoptionen aufzuzeigen.

Der Schwerpunkt des ersten Statusberichts 2013 lag auf der Frage der Versorgungssicherheit im Stromsektor. Hierzu konnte konstatiert werden, dass kurzfristig nicht mit einer Abnahme des Versorgungssicherheitsniveaus im Land zu rechnen ist. Der Umstrukturierungsprozess hat begonnen, muss aber weiterhin begleitet und beobachtet werden. Daneben befasst sich der Bericht mit dem Fortschritt des Stromnetzausbaus, der Erdgas-Infrastruktur, der Verbrauchsentwicklung sowie der Entwicklung der Energiepreise. Dieser Monitoring-Prozess wird fortgeführt. Die Arbeiten auf Landesebene werden durch die Erkenntnisse ergänzt, die Prof. Dr. Frithjof Staiß als Mitglied der Energiewendekommission auf Bundesebene gewinnt.

// Monitoring the energy turnaround in Baden-Württemberg

The challenges of the energy turnaround are particularly great in Baden-Württemberg since nuclear power, which has been traditionally dominant, must now be replaced by renewable energy. In addition, the state has set itself ambitious targets with its Climate Protection Act: by 2020, greenhouse gas emissions are to be reduced by 25% compared to levels from 1990. At the same time, the level of supply security must be maintained. The complexity of the transformation process requires the precise monitoring and evaluation of the relevant developments in the energy industry and energy policy. The Systems Analysis research department was commissioned by the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector with a corresponding monitoring task within the state. The aim is to analyse the implementation and impact of the energy turnaround and to identify undesirable developments and options for action.

The focus of the first status report in 2013 was the question of security of supply in the electricity sector. The research department stated that a decrease in the state's security of supply was not expected in the short term. The restructuring process has begun, but it still requires support and monitoring. In addition, the report looks at the progress made with grid expansion, the natural gas infrastructure and the development of consumption and energy prices. This monitoring process will continue. The work at the state level is supplemented by the experience that Prof. Dr. Frithjof Staiß gathers as a member of the Energy Turnaround Commission at the federal level.



// Erwartete Entwicklung der gesicherten Leistung in Baden-Württembergs Kraftwerkspark bis 2020.
// Expected development of the firm capacity within Baden-Wuerttemberg's generation system until 2020.

// Contact
Maïke Schmidt
E-mail: maïke.schmidt@zsw-bw.de
Phone: +49(0)711 78 70-232

// Analyse des zukünftigen Stromspeicherbedarfs in BW

Analysis of future electricity storage requirements in BW

// Analyse des zukünftigen Speicherbedarfs für Strom in Baden-Württemberg

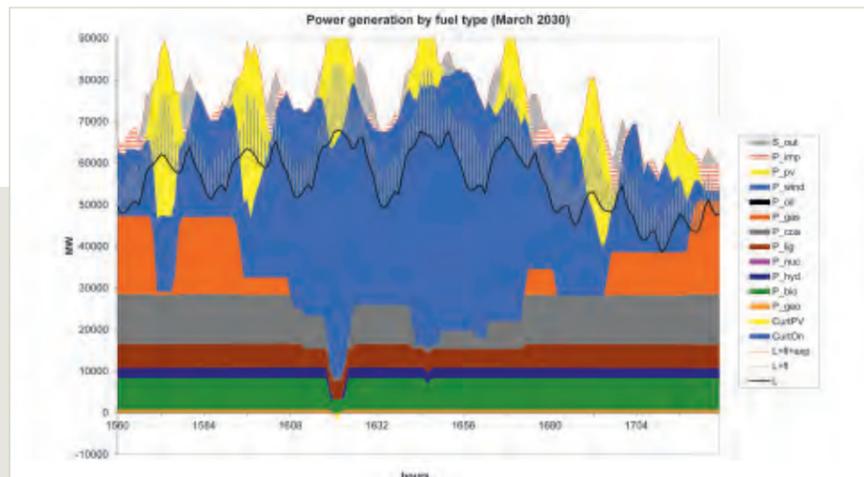
Im Rahmen des Forschungsvorhabens SimBW wurde mithilfe des ZSW-Strommarktmodells REMO der deutsche Kraftwerkspark mit Fokus auf Baden-Württemberg unter dem Einfluss des Ausbaus erneuerbarer Energien (EE) simuliert. Dies erfolgte in stündlicher Auflösung für die Stichjahre 2020, 2030, 2040 und 2050. Ziel der Modellrechnungen war es, den Bedarf für Energiespeicherung unter Berücksichtigung von äußeren Einflussparametern in den verschiedenen Szenarien zu ermitteln. Dabei wurde für unterschiedliche Speichertypen untersucht, ob sie sich auf dem Markt etablieren können und welchen Systembeitrag sie leisten.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass Speicher bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung (deutlich über 60%) einen entscheidenden ökonomischen und ökologischen Beitrag zum Energiesystem leisten können. Da Speicher jedoch auch bei niedrigeren regenerativen Anteilen aus technischer Sicht einen Systembeitrag leisten können, ist eine sorgfältige Abwägung erforderlich. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde ein 3-Phasen-Modell für die Markteinführung von Speichern abgeleitet: In einer frühen Phase (EE-Anteil bis 40%) stehen Forschung und Entwicklung sowie Demonstration neuer Technologien im Vordergrund. In der mittleren Phase (EE-Anteil von 40% bis 60%) erfolgt ein kontinuierlicher Speicheraufbau nach einem verbindlichen Ausbaupfad mit begleitenden marktnahen Instrumenten. In der späten Phase schließlich (EE-Anteil über 60%) ist der Speicheraufbau bzw. -betrieb auch unter Marktbedingungen wirtschaftlich.

// Analysis of future electricity storage requirements in Baden-Württemberg

As part of the SimBW research project, the German generation mix was simulated using the ZSW electricity market model REMO, with a focus on Baden-Württemberg taking the impact of renewable energy expansion into account. There was an hourly resolution for the selected years of 2020, 2030, 2040 and 2050. The aim of the model calculations was to determine the need for energy storage systems taking into account any external influence parameters in the different scenarios. It was analysed whether various types of storage systems are able to establish themselves on the market and what they can contribute to the energy system.

The results of the simulation show that storage systems can make a significant economic and environmental contribution to the energy system given high shares of renewable energy in overall electricity generation (well over 60%). From a technical perspective, however, storage systems can make a contribution to the system even with lower renewable energy shares, so careful consideration is required. The findings were used to derive a three-phase model for the market introduction of storage systems: In an early phase (a renewable energy share of up to 40%), research, development and demonstration of new technologies are the main focuses. In the middle phase (a renewable energy share of between 40 to 60%), a continuous storage system expansion takes place as per a binding target path along with accompanying market-based instruments. In the final phase (a renewable energy share of over 60%), storage system expansion and operation is economically beneficial even under market conditions.



// Simulierte Stromerzeugung mit dem Strommarktmodell REMO.
// Simulated power generation with the REMO electricity market model.

// Contact
Holger Höfling
E-mail: holger.hoefling@zsw-bw.de
Phone: +49(0)711 7870-332

// Wirtschaftliche Potenziale von Windkraftprojekten

Economic potentials of wind power projects

// Wirtschaftliche Potenziale von Windkraftprojekten durch maschinelle Lernverfahren

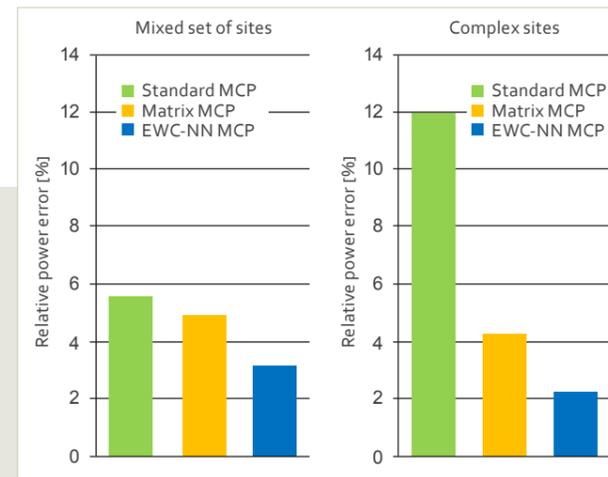
Um festzustellen, ob sich ein Standort für ein Windkraftprojekt eignet, brauchen Investoren, Projektierer und Anlagenbetreiber ein Standortgutachten. Dabei müssen Unsicherheiten aus Meteorologie und Technologie in Kauf genommen werden, die sich direkt auf die Finanzierung von Projekten durch die beteiligten Banken auswirken können. Um diese Risiken weitestgehend zu minimieren, hat das Fachgebiet Systemanalyse zusammen mit einem Wetterdienstleister eine neuartige Methode des Langzeitbezugs von Windmessungen (MCP) für Windkraftstandorte entwickelt, die wetter- und technologiebedingte Unsicherheiten gegenüber den herkömmlichen Verfahren deutlich reduziert.

Auf tiefen neuronalen Netzen aufbauend ermöglicht das Verfahren nichtlineare Korrekturen der Zeitreihen, welche die Korrelation, also die zeitliche Übereinstimmung, zur Messung verbessern. Das Ergebnis basiert auf aktuellen Messwerten vor Ort und liefert eine 34 Jahre umfassende, stündliche Windzeitreihe für die projektierte Windkraftanlage bzw. den Messstandort. Bei der detaillierten Evaluation des maschinellen Lernverfahrens zeigt sich die Überlegenheit gegenüber herkömmlichen Methoden. So sind die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit sowie die Korrelation zwischen Messung und Langzeitdaten optimiert und weisen in allen betrachteten Fällen wesentlich geringere Fehler in der Ertragsabschätzung auf als z. B. bei klassischen Verfahren mit linearer Regression oder der Matrix-Methode (siehe Abb.). Schon bei einer Messdauer von neun Monaten erreicht das Verfahren das Qualitätsniveau klassischer Methoden. Bei Beobachtungszeitreihen von zwölf Monaten reduzieren sich auch an komplexen Standorten bisherige Fehler um 50%.

// Economic potentials of wind power projects with machine-based learning methods

Investors, project developers and plant operators need an expert opinion to assess the suitability of a location for a wind power project. However, the parties involved must put up with uncertainties in meteorology and technology which can directly affect project funding by the participating banks. In order to minimise these risks as far as possible, the Systems Analysis research department and a meteorological service provider jointly developed a novel method for long-term wind data measurements correlations (MCP) for wind power sites that significantly mitigates uncertainties in terms of weather and technology compared with traditional methods.

Based on deep neural networks, this method allows non-linear corrections to time series, which improves the correlation – the temporal coincidence – with the measurement itself. The result is based on ongoing measurements on site and provides a 34-year, hourly wind time series for the projected wind turbine or the location of measurement. The detailed evaluation of the machine-based learning method demonstrates its superiority over conventional methods. The frequency distributions of wind speed and the correlation between the measurement and long-term data are optimised, and in all cases considered have significantly less errors in the estimation of yield than conventional methods, such as linear regression or the matrix method (see fig. below). With a measurement period of nine months, the method reaches the quality level of conventional methods. With an observation time series of twelve months, previous errors are reduced by 50% even in complex locations.



// Relativer Fehler des zu erwartenden Ertrags von Windkraftstandorten gemittelt über eine Mischung von 6 Standorten (links) sowie 6 komplexe Standorte (rechts). Das neuartige EWC-NN-MCP-Verfahren reduziert den Fehler um beinahe 50% im Vergleich zur nächstbesten Methode.
// Relative error of the expected yield of wind power sites averaged over a mixture of 6 sites (left) and 6 complex sites (right). The novel EWC-NN MCP method reduces the error by almost 50% compared with the next best method.

// Contact
Anton Kaifel
E-mail: anton.kaifel@zsw-bw.de
Phone: +49(0)711 78 70-238

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

// Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschicht-Technologien bietet für Photovoltaikmodule ein hohes Potenzial zur Kostensenkung. Insbesondere die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende Technologie (CIGS) hat sich mit den höchsten Wirkungsgraden aller Dünnschicht-Technologien und einer weit entwickelten Fertigungstechnologie in der industriellen Produktion bewährt.

Das CIGS-Technikum des ZSW umfasst alle Maschinen und Anlagen, die erforderlich sind, um Dünnschicht-Solarmodule von der Vorbereitung der Glassubstrate bis hin zur Befestigung der Anschlusskabel am fertigen Modul herzustellen. Die Anlagen sind im Unterschied zu einem typischen Laborbetrieb weitgehend für Durchlaufprozesse ausgelegt, sodass eine große Nähe zu industriellen Verfahren gegeben ist (Arbeitsgruppe FACIS). Der Einsatz von flexiblen Substratmaterialien wie Polymer- oder Metallfolien anstelle des heute überwiegend eingesetzten Glassubstrats wird in einem zweiten Technikum für eine Rolle-zu-Rolle-Beschichtung erarbeitet. Die Herstellung und Optimierung dieser flexiblen CIGS-Module ist Schwerpunktthema der Arbeitsgruppe FLEXIS. Neue kostengünstige Depositionsverfahren, z. B. Drucktechnologien, werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme in einem eigenen Labor weiterentwickelt (Arbeitsgruppe NEMA). Die langjährigen Erfahrungen des MAT-Teams in der Entwicklung von CIGS-Solarmodulen fließen in Dienstleistungen für die Industrie ein: Im Kundenauftrag übernehmen wir vielfältige Analytaufgaben (z. B. hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse), die Abscheidung von elektrischen Kontaktschichten sowie die elektrische und optische Charakterisierung von Zellen und Modulen.



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

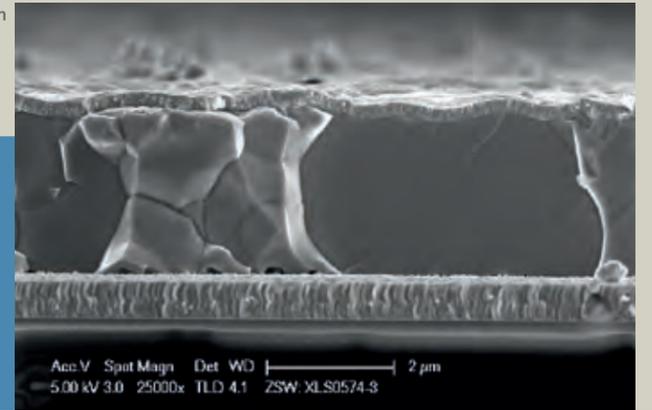
// Our main focus

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

The CIGS technical lab at ZSW includes all the machines and systems necessary for producing thin-film solar modules, ranging from the preparation of the glass substrates to the fixing of the connection cables to the finished module. In contrast to laboratory operation, the systems are largely engineered for throughput processes and therefore they closely mirror industrial processes (FACIS working group). The use of flexible substrate materials such as polymer and metal films instead of the glass substrates predominantly used today is being developed in a second technical lab for roll-to-roll coating. The manufacture and optimisation of this flexible CIGS module form the focus of the FLEXIS working group. New cost-effective deposition processes such as print technologies are being developed for new organic and inorganic semiconductor systems in a special laboratory (NEMA working group). The MAT team's many years of experience in developing CIGS thin-film solar modules is also being leveraged for industrial services: on behalf of customers, we provide diverse analytical support (e.g. high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis), deposition of electrical contact layers as well as the electrical and optical characterisation of cells and modules.

// Bruchkante einer Cu(In,Ga)Se₂-Solarzelle aus dem Rekord-Run in einer Aufnahme aus dem Rasterelektronenmikroskop.
// Breaking edge of a Cu(In,Ga)Se₂ solar cell from the record-breaking run as seen with a scanning electron microscope.

// CIGS-Technologie auf Glas CIGS technology on glass



// Neuer Weltrekord für Dünnschicht-Solarzellen von 20,8%

Das ZSW hat den Wirkungsgrad von Cu(In,Ga)Se₂-Solarzellen (kurz: CIGS) von 20,3% auf 20,8% deutlich gesteigert. Der neue Rekord stellt im Vergleich zur konkurrierenden Siliziumtechnologie einen besonderen Meilenstein dar, denn erstmals konnte CIGS nicht nur mit dem Bestwert für multikristalline Solarzellen, der aktuell bei 20,4% liegt, gleichziehen, sondern ihn sogar übertreffen. Entscheidend für den neuerlichen Erfolg war der kontinuierliche Betrieb einer Hocheffizienz-Forschungslinie, die speziell der Auslotung des maximalen Potenzials der CIGS-Dünnschicht-Technologie gewidmet ist. Sie bietet eine große Flexibilität in der Gestaltung innovativer Prozessvariationen und ist gleichzeitig darauf ausgelegt, ein größtmögliches Maß an Reproduzierbarkeit zu erreichen. Auf diese Weise können am ZSW reproduzierbar CIGS-Solarzellen auf Höchstniveau hergestellt und weiterentwickelt werden – eine entscheidende Voraussetzung für die weitere Steigerung des Maximalwirkungsgrades der CIGS-Solartechnologie.

// Alternativpuffer

Der Ersatz des heute noch überwiegend eingesetzten Puffermaterials Kadmiumsulfid (CdS) ermöglicht prinzipiell eine weitere Steigerung der Wirkungsgrade durch eine verbesserte Transmission im Wellenlängenbereich zwischen 350 nm und 550 nm. Als geeignetes Materialsystem wird Zinksulfid (ZnS) eingesetzt, das sowohl nasschemisch als auch mit Sputterprozessen abgeschieden werden kann. Mit nasschemisch abgeschiedener Zn(S,O)-Pufferschicht wurde ein zertifizierter Zellwirkungsgrad von 19,0% erzielt, der einen neuen Europarekord darstellt (siehe Abb.).

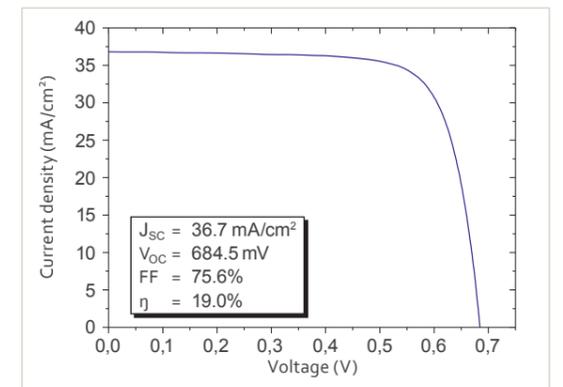
// New world record of 20.8% for thin-film solar cells

ZSW has significantly increased the efficiency of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells (abbreviated CIGS) from 20.3% to 20.8%. Compared with competing silicon technology, the new record is a special milestone because, for the first time, CIGS surpassed the best value for multikristalline solar cells, which is currently at 20.4%. The decisive factor in this success was the continuous operation of a high-efficiency research line that is specifically devoted to the exploration of the maximum potential of CIGS thin-film technology. It offers great flexibility in the design of innovative process variations and is designed to attain a high degree of reproducibility. This way, CIGS solar cells with the highest quality level can be produced and refined at ZSW – a crucial prerequisite for further increasing maximum efficiency in CIGS technology, thereby decreasing the cost of solar power.

// Alternative buffers

In principle, the replacement of the buffer material still predominantly used today, cadmium sulphide (CdS), allows for a further increase in efficiency through an improved transmission in the wavelength range between 350 nm and 550 nm. A suitable material system of zinc sulphide (ZnS) is used, which can be deposited either wet-chemically or with sputtering processes. A certified cell efficiency of 19.0% was achieved with a wet-chemically deposited Zn(S,O) buffer layer – a new European record (see fig.).

// IU-Kennlinie der zertifizierten CIGS-Zelle mit Cd-freiem Puffer basierend auf dem Materialsystem Zn(S,O).
// IU characteristic curve of the certified CIGS cell with Cd-free buffer based on the material system Zn(S,O).



// Dr. Wiltraud Wischmann

Für noch effizientere und kostengünstigere Dünnschicht-Solarmodule unterstützen wir die Industrie bei der Weiterentwicklung von Materialsystemen sowie Produktionsprozessen und erforschen das Potenzial neuer Ansätze.

We support the industry in the advancement of material systems and manufacturing processes and explore the potential of new approaches for even more efficient and cost-effective thin-film solar modules.

// CIGS-Technologie auf flexiblen Materialien

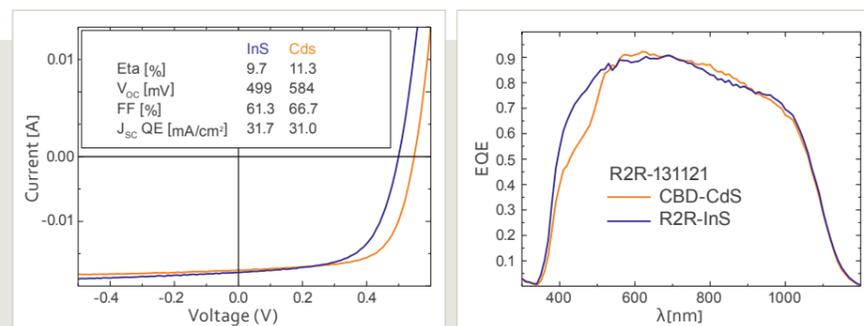
CIGS technology on flexible materials

// Rolle-zu-Rolle-Beschichtung auf Polymerfolie

An der Rolle-zu-Rolle-Anlage am ZSW wird bevorzugt 25 µm dicke Polymerfolie (Polyimid) beschichtet, die derzeit zu den kostengünstigsten Substraten gehört. Die 300 mm breite Folie ist zudem sehr leicht und erlaubt auch die Herstellung monolithisch verschalteter Module. Ein wesentlicher Nachteil gegenüber Metallfolien ist die eingeschränkte Temperaturbeständigkeit, sodass bei der CIGS-Koverdampfung die Maximaltemperatur gegenüber der Standardprozessierung auf Glas oder Metallband um ca. 200 °C abgesenkt werden muss. Die Anlage am ZSW ist so konzipiert, dass am Ende alle Beschichtungsschritte vom Molybdän-Rückkontakt über den CIGS-Absorber, die Pufferschicht und die ZnO-Fensterschicht parallel und im gleichen Vakuum vorgenommen werden können. Beim Absorber wurde ein mehrstufiger CIGS-Niedertemperaturprozess mit Wirkungsgraden bis 11,7 % umgesetzt, der ständig weiterentwickelt wird.

Ein wichtiger Schritt in der „All-Vacuum“-Abscheidung ist das Ersetzen der normalerweise nasschemisch abgeschiedenen CdS-Pufferschicht durch einen im Vakuum aufgetragenen Puffer. Dafür wurde am ZSW in einer separaten Inline-Anlage ein Indiumsulfid-Puffer (InS) entwickelt, der nach der CIGS-Beschichtung aufgedampft wird. In Vorversuchen auf Glas mit hocheffizienten Absorbieren konnten Wirkungsgrade von bis zu 18,2 % demonstriert werden. Mit einer neu eingebauten InS-Verdampferquelle kann ohne Vakuumunterbrechung gleich nach dem CIGS-Prozess der InS-Puffer aufgedampft werden. Die Abbildung unten links zeigt erste Ergebnisse einer „integrierten“ InS-Beschichtung aus der Rolle-zu-Rolle-Anlage im Vergleich zu einer Referenzschicht auf Polymer mit nasschemisch abgeschiedenem CdS-Puffer. Die Leerlaufspannung V_{oc} liegt zwar unter derjenigen der CdS-Probe, ein Vergleich der externen Quanteneffizienz EQE (unten rechts) zeigt jedoch, dass die Ausbeute mit InS-Puffer im kurzwelligen Bereich höher liegt als bei der CdS-Probe.

// Strom-Spannungs-Kurve einer CIGS-Solarzelle mit InS-Puffer (blau) und CdS-Puffer (orange) auf Polyimidfolie.
// Current-voltage curve of a CIGS solar cell with an InS buffer (blue) and a CdS buffer (orange) on polyimide film.



// Contact

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

// Externe Quantenausbeute (EQE) der beiden flexiblen Solarzellen im Vergleich.
// Comparison of the external quantum efficiency (EQE) of the two flexible solar cells.

// Neues Material für Dünnschicht-Solarzellen

New material for thin-film solar cells

// Kesterit-Solarzellen als Alternative zu CIGS

Neben CIGS wird am ZSW seit einigen Jahren verstärkt an einem ähnlichen Materialsystem $Cu_2ZnSnSe_4$ geforscht, das dem CIGS sehr ähnlich ist, aber nicht auf den relativ seltenen Elementen Indium und Gallium basiert, sondern mit den kostengünstigen und gut verfügbaren Elementen Zink und Zinn auskommt. Die dabei sich ausbildende Kristallform gibt diesem System den meistens verwendeten Namen „Kesterit“.

Das ZSW konnte nun einen einfachen Herstellungsprozess für Kesterit-Dünnschicht-Solarzellen entwickeln. Die beste Solarzelle erreicht einen Wirkungsgrad von 10,3 % – ein neuer Europarekord. Neben der alternativen Rohstoffverwendung ermöglicht die neue Verbindung auch eine günstigere Produktion mit einem einfachen Druckverfahren: Zur Herstellung der Kesterit-Solarzellen wird Substratglas mit einer nichttoxischen Tintenlösung beschichtet, die die gewünschten Elemente enthält – und das ohne aufwendige Vakuumtechnologie. Die so hergestellte Vorläufer- oder Precursor-Schicht wird anschließend unter Hitzeeinwirkung selenisiert. Die weitere Verarbeitung erfolgt mit den gleichen Verfahren wie bei der verwandten CIGS-Technologie. Die guten Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung exzellenter Grundlagenforschung für die anwendungsorientierte Entwicklung neuer Solarzellentechnologien. Die Arbeiten wurden von der Karlsruhe School of Optics and Photonics (KSOP) im Rahmen eines Doktorandenstipendiums unterstützt.

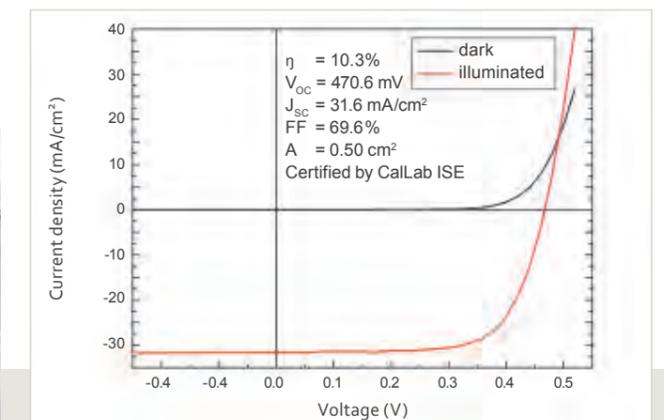


// Mitarbeiter des ZSW präsentieren die Rekord-Kesterit-Zelle.
// ZSW staff present the record kesterite cell.

// Kesterite solar cells as an alternative to CIGS

In addition to CIGS, ZSW has been putting increased effort in a similar material system for several years now, namely $Cu_2ZnSnSe_4$, which is very similar to CIGS, but instead of relying on the relatively rare elements indium and gallium, consists of the earth-abundant and cost-effective elements zinc and tin. Due to the similarity of their crystal structures, the compound is also commonly named after the mineral kesterite.

ZSW was able to develop a simple production process for kesterite thin-film solar cells. The top-performing cell reaches an efficiency of 10.3% – a new European record. In addition to an alternative use of resources, the new compound also allows for a less expensive and less complex production method with a simple printing process: during the kesterite solar cell manufacturing process, substrate glass is coated with a non-toxic ink solution containing the desired elements – without requiring any complex vacuum technology. The resulting precursor layer is then selenised in a heating process. The remaining production process involves the same methods as the related CIGS technology. The good results once again confirm the importance of excellent basic research for the application-oriented development of new solar cells. The work was supported by the Karlsruhe School of Optics and Photonics (KSOP) as part of a PhD scholarship.



// Strom-Spannungs-Kennlinie der Rekordzelle.
// Current-voltage characteristic curve of the record-breaking cell.

// Contact

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Auf der Basis von 25 Jahren Testerfahrung mit Photovoltaik(PV)-Modulen aus kristallinem Silizium (c-Si) und aus Dünnschichtmaterialien werden im Modultestlabor Solab Untersuchungen zum Energieertrag sowie zur Langzeitstabilität von PV-Modulen und -Systemen durchgeführt. Für die Charakterisierung der Modulstabilität werden Resultate aus beschleunigten Alterungstests im Labor mit Degradationseffekten unter Freifeld-Betriebsbedingungen korreliert. Neue Verfahren zur Analyse von Freilandmessreihen ermöglichen es, auch im Schwachlichtbereich kleinste Degradationseffekte aufzuspüren. Die potenzialinduzierte Leistungsdegradation (PID) wird durch beschleunigte Alterung unter Hochspannung und bei Beleuchtung in der Klimakammer und an einem speziellen Teststand im Freifeld untersucht. Zu unserer Beratungskompetenz gehören neben der Qualitätskontrolle von PV-Modulen und der Wirkanalyse von Störfaktoren (Klima, mechanische Belastung, Verschmutzung, elektrische Spannung) die Prüfungen („Due Diligence“) von PV-Großanlagen und von PV-Produktionsstätten im Auftrag finanzierender Banken, von Projektierern oder Betreibern.

Daneben befasst sich das Fachgebiet mit der Integration von PV-Anlagen in Energiesysteme auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen. Dabei werden der elektrische und thermische Energiebedarf ebenso untersucht wie optimierte Betriebsstrategien für dezentrale Speicher. Ziele sind, die Stromverbrauchs- und Netzzeinspeiseprofile zu glätten und dabei die Wirtschaftlichkeit von lokalen PV-Anlagen und Speichern für Hauseigentümer und Industrie zu verbessern sowie die Netzbelastung zu reduzieren. Daher berät das Fachgebiet auch bei Entwicklung, Auslegung und Tests von Algorithmen und Geräten (PV-Speichersystemen, Wärmeerzeugern etc).



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

// Our main focus

Based on 25 years of testing experience with photovoltaic (PV) modules from crystalline silicon (c-Si) and thin-film materials, investigations on the energy yield and long-term stability of PV modules and systems are conducted in the Solab module test laboratory. In order to characterise module stability, results from accelerated ageing tests in the laboratory are correlated with degradation effects under outdoor operating conditions. New methods for analysing outdoor measurement series enable the tiniest degradation effects to be detected in the low-light range. Potential-induced degradation (PID) is investigated using accelerated ageing under high voltage and lighting in a climate chamber and on a special outdoor test rig. Aside from the quality control of PV modules and the impact analysis of interference factors (climate, mechanical loads, soiling, electrical voltage), our consultancy expertise includes (due diligence) inspections of large-scale PV installations and PV production facilities on behalf of financing banks, project developers and operators.

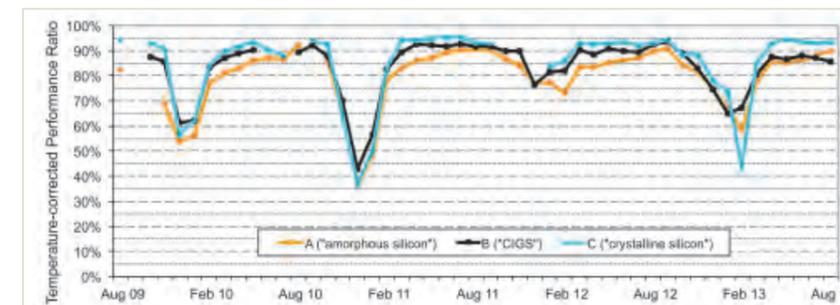
In addition to module tests, the research department deals with the optimum integration of PV plants in energy systems from different points of view. Electrical and thermal energy requirements are considered alongside optimised operating strategies for distributed storage systems. The objectives are to even out power consumption and feed-in profiles, thereby improving the efficiency of local PV systems and storage systems for homeowners and the industry alike, as well as reducing grid load. The research department therefore also provides consulting on the development, design and testing of algorithms and devices (PV storage systems, heat generators, etc.).

// Solar-Testfeld Widderstall Widderstall solar test facility

// Langzeittest aktueller Modultechnologien

Auf dem ZSW-Testfeld Widderstall werden PV-Module nicht nur einzeln, sondern auch in Aufbauten von Modulfeldern in kleinen PV-Generatoren untersucht. Im Fokus steht dabei die Entwicklung der Leistungsfähigkeit von der Anfangsstabilisierung über mehrere Jahres- und Klimazyklen hinweg bis zu Langzeittrends. Die umfassende, präzise Messtechnik und die detaillierte Analyse der Messdaten mit Differenzierung nach Betriebsbedingungen dienen nicht nur zur Überprüfung und Dokumentation der Leistungsstabilität. Sie liefern außerdem wertvolle Charakteristiken zur Abschätzung der aus PV-Kraftwerken mit solchen Modulen zu erwartenden Erträge.

Die Abbildung zeigt für drei PV-Generatoren mit Modulen unterschiedlicher Technologien den Verlauf des Leistungsfaktors (Gleichstromseite, temperaturkorrigiert) über vier Jahreszyklen hinweg. Die erheblichen Schwankungen sind auf die wechselnden Wetterbedingungen zurückzuführen, einschließlich vorübergehender Schneebedeckungen in den Wintermonaten. Die Leistung der Generatoren ist im Wesentlichen stabil. Der Generator mit PV-Modulen aus amorphem Silizium (gelb) zeigt eine starke Variation der Leistungsfähigkeit über die Jahreszeiten, die sich jährlich sehr gleichmäßig wiederholt. Aus der Detailanalyse der Betriebsdaten geht hervor, dass es sich um periodische Minderungen und Erholungsvorgänge handelt, die hier annähernd gleichmäßig für alle Bestrahlungsstärkeniveaus sind.



// Verlauf des monatlichen Leistungsfaktors (Gleichstrom, temperaturkorrigiert) für drei PV-Generatoren mit unterschiedlichen PV-Modulen auf dem Testfeld Widderstall.
// Trace of the monthly mean DC performance ratio (temperature-corrected) for three PV generators with different technologies.

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



// Dr.-Ing. Jann Binder

Die Kunden erwarten stabile Erträge aus Photovoltaikanlagen. Wir testen Langzeitstabilität und optimieren Betriebsstrategien, um die Wertschöpfung zu sichern.

Customers expect reliable yields from their photovoltaic systems. We test long-term stability and optimise operating strategies to secure added value.



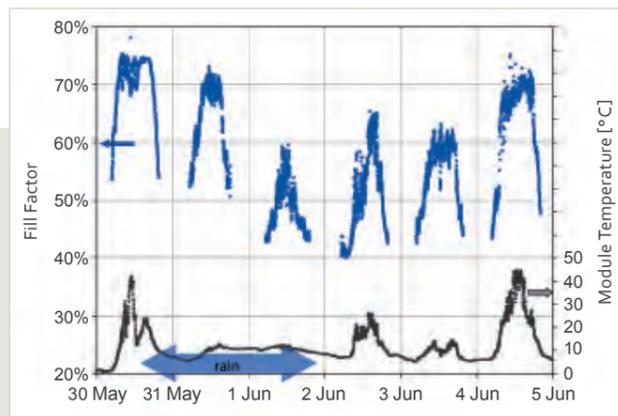
// Korrelation von Modulprüfungen in Labor und Freifeld

Correlation between laboratory and outdoor module tests

// Potenzialinduzierte Degradation (PID) von PV-Modulen

Bei PV-Modulen, die im Feld in Strängen zu hoher Spannung in Serie verschaltet sind, kann die sogenannte potenzialinduzierte Degradation (PID), eine Abnahme der Modulleistung, auftreten. Auslöser dafür sind Leckströme, die bei feuchtnasser Umgebung über die Moduloberfläche durch das Glas zur Zelle fließen. Dem Problem kann auf Systemebene durch Erdung der negativen Seite des Stranges begegnet werden sowie auf Modulebene durch den Einsatz von besser isolierenden Verkapselungsmaterialien und PID-resistenten Zellen. Für die Qualifikation von Modulen werden im aktuellen Entwurf der IEC 62804 zwei PID-Testmethoden für das Labor genannt. Größtes Problem dabei ist jedoch die fehlende Korrelation zwischen der PID-Prüfung im Labor und dem tatsächlichen Verhalten im Feld. So spielt bei c-Si-Modulen für das Stabilitätsverhalten neben der leckstrombedingten Degradation eine Erholung der Leistung durch thermisches Ausheilen eine wesentliche Rolle, bei CIGS-Dünnschichtmodulen dagegen kaum. Um diese Lücke zu schließen, wurde ein Monitoring-System entwickelt und am Testfeld Widderstall aufgebaut, das erstmalig eine In-situ-Beobachtung des PID-Verlaufs eines unter kritisches Potenzial gesetzten Moduls ermöglicht.

Die Abbildung zeigt den Verlauf des Füllfaktors (FF) eines stark PID-anfälligen c-Si-Moduls während eines etwa zwei Tage andauernden Dauerregens. Der FF nimmt während der Regenperiode deutlich ab. Die sich daran anschließende Erholung von FF und Modulleistung wird verursacht durch die bei schönem Wetter wieder höhere Modultemperatur. Das kurz- und langfristige Stabilitätsverhalten von PV-Modulen kann nun im Freifeld direkt beobachtet und mit den Ergebnissen aus den PID-Laboruntersuchungen korreliert werden. Eine wichtige Erkenntnis daraus ist, dass die thermischen Erholungsprozesse bei c-Si-Modulen zukünftig stärker adressiert werden müssen.



// Potential-induced degradation (PID) of PV modules

Potential-induced degradation (PID), a deterioration of performance, can occur in PV modules that are series-connected in the field to form high-voltage strings. Triggers include leakage currents in humid and wet environments that leak through the glass into the cell via the module's surface. The problem can be addressed at the system level by earthing the negative side of the string, and at the module level by using better insulated encapsulation materials and PID-resistant cells. Two PID laboratory test methods for the qualification of modules are mentioned in the current IEC 62804 draft. However, the biggest problem here is the lack of correlation between PID testing in the laboratory and actual behaviour out in the field. Degradation caused by leakage currents plays an important role in the stability of c-Si modules, as well as performance recovery due to thermal annealing, whereas both of these factors are not relevant to CIGS thin-film modules. In order to close the knowledge gap related to correlation, a monitoring system has been developed and built at the Widderstall test facility that for the first time allows in situ observations of the PID process of a module to which a critical potential is applied.

The figure below shows the development of the fill factor (FF) of a highly PID-prone c-Si module throughout two days of continuous rain. The FF decreases significantly during the period of rain. The subsequent recovery of the FF and module performance is caused by the higher module temperature in warmer weather. The short- and long-term stability behaviour of PV modules can now be directly observed in the field and correlated with results from the PID laboratory tests. One important finding from this is that thermal recovery processes in c-Si modules need more focus in the future.

// Einbruch und Erholung des Füllfaktors (blau) eines c-Si-Moduls im PID-Feldtest. Ebenso gezeigt ist der Verlauf der Modultemperatur (schwarz).
 // Drop and subsequent recovery of the fill factor (blue) of a c-Si module in the PID field test. Also shown is the module temperature history (black).

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

// Netzintegration von Photovoltaikanlagen

Grid integration of photovoltaic systems

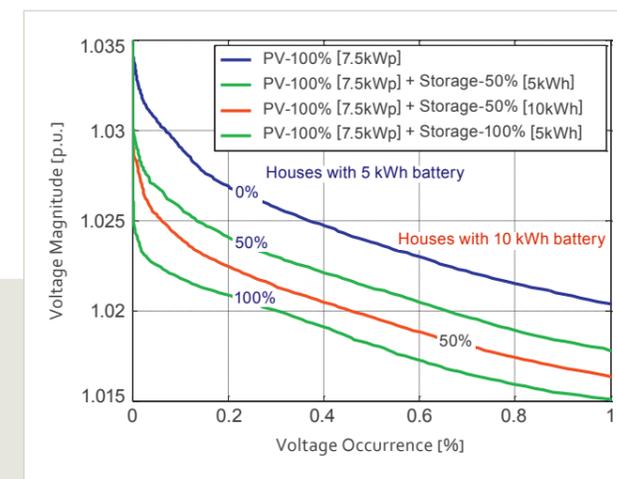


// Netzentlastung durch Speicher

PV-Anlagen speisen in Deutschland zu einem großen Anteil ins Niederspannungsnetz ein. Das Maximum in der Mittagszeit erzeugt in Regionen mit hoher Anlagendichte Spannungsüberhöhungen im Verteilnetz. Das ZSW entwickelt Algorithmen zur optimierten Speichernutzung und zur entsprechenden Steuerung lokaler Verbraucher, um notwendige Abregelungen der PV-Erzeugung zur Netzentlastung zu minimieren.

Diese Algorithmen erreichen eine Netzentlastung bei gleichzeitig hohem Eigenverbrauch und gleichbleibender Wirtschaftlichkeit der Speicher und PV-Anlagen. Geeignet sind die Algorithmen ferner, um Speicher zur Glättung von Lastprofilen industrieller Nutzer einzusetzen und damit Strombezugskosten zu reduzieren. Beispielhaft zeigt die Abbildung unten die in der Simulation auftretenden Spannungen in einem typischen Dorfnetz. Rot gezeichnet sind die Spannungen ohne Photovoltaik, blau mit angenommenen Solaranlagen von 7,5 kWp Nennleistung auf jedem Haus und schließlich grün mit 5-kWh-Speicher in jedem Haus.

Nimmt man den Bereich der kritischen hohen Spannungen unter die Lupe, so zeigt sich eine Reduktion der Überspannungen um rund 25 % durch die optimiert betriebenen elektrischen Speicher. Dabei entsteht bei vollständiger Durchdringung mit Speichern ein besserer Effekt als bei Verwendung von doppelt so großen Speichern in jedem zweiten Haus.



// Grid relief through storage systems

A large share of the electricity generated by PV systems in Germany is fed into the low voltage grid. In regions with a high system density, the maximum output achieved at midday creates an excess voltage in the distribution network. ZSW is developing algorithms for an optimised storage system utilisation and corresponding management of local loads to minimise the necessity of limitations on PV generation for grid relief.

These algorithms achieve grid relief with a high level of self-consumption and consistent operating efficiency of storage and PV systems. The algorithms can also be used to apply storage systems in order to equalise the load profiles of industrial users, and therefore reduce electricity costs. As an example, the figure to the bottom shows the voltages occurring in the simulation of a typical village grid. The voltages without photovoltaics are marked red, assumed solar power systems with rated outputs of 7.5 kWp on every house are marked blue, and 5-kWh storage systems in every house are marked green.

Taking a closer look at the range of critical high voltages, one notices a reduction of excess voltage by around 25% due to the optimised electrical storage systems. Market saturation with storage systems has a better effect than storage systems twice as large in every second house.

// Auftretende Spannung im Verteilnetz sortiert nach Wert und prozentualer Häufigkeit.
 // Voltage levels observed in a distribution net, sorted by value and occurrence in per cent.

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Die Motivation zur Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Brennstoffe und Kraftstoffe ist:

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

Im Fachgebiet REG werden neue Technologien zur Herstellung von Synthesegas, Wasserstoff und Erdgassubstitut (SNG) entwickelt und im technischen Maßstab bis zu einigen 100 kW erprobt. Neben der Elektrolyse, der Brennstoffreformierung und der Erzeugung biomassestämmiger Synthesegase durch Vergasung/Pyrolyse sind die Gasreinigung, die Gaskonditionierung sowie die Kraftstoffsynthese wichtige Aufgabengebiete. Zielsetzung im Themenfeld Elektrolyse ist die Kostenreduktion der gesamten Wasserstoffherstellung durch Modularisierung der Systemkomponenten und die Weiterentwicklung des Elektrolyseblocks. Zielsetzung bei der Gasprozesstechnik ist die Erzeugung eines brennstoffzellentauglichen Gases, eines Brenngases für die Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstoffherstellung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

Zu unseren Schwerpunkten zählen Power-to-Gas P2G®, Elektrolyse, thermochemische Konversion biogener Ressourcen sowie Brennstoffreformierung/-konditionierung.



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

// Our main focus

The motivation for the generation and use of renewable fuels is:

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

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

Our key aspects are power-to-gas P2G®, electrolysis, thermochemical conversion of biomass as well as fuel reforming/conditioning.

// Weiterentwicklung der alkalischen Elektrolysetechnik

Advancement of alkaline electrolysis technology

// Weiterentwicklung der alkalischen Elektrolysetechnik

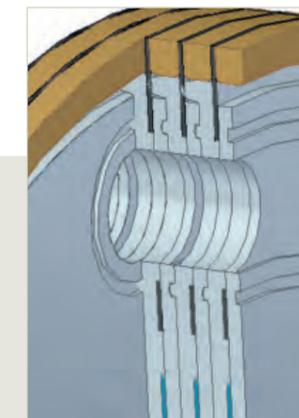
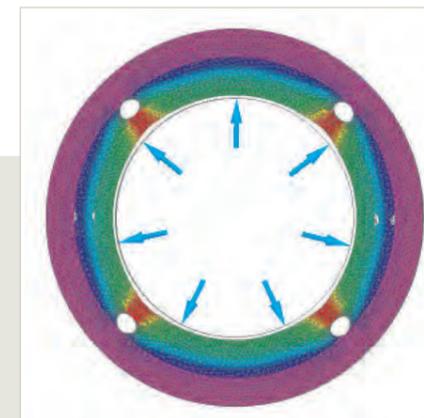
In den ersten zwölf Monaten des dreijährigen Projektes „P2G-Elektrolyse“, das vom Bundesumweltministerium gefördert wird, standen u. a. folgende technische Entwicklungsarbeiten auf dem Weg zum Bau eines 300-kW-Demonstrationssystems im Fokus:

- > Entwicklung eines Elektrolyse-Blockkonzepts für den Druckbetrieb mit 25 bar Nenndruck. Zugleich Erarbeitung von Alternativkonzepten für preiswert herstellbare Zwei-Stoff-Zellrahmen ohne separate Dichtungselemente mit einer Elektrodenfläche von 3.000 cm².
- > Auswahl des besten Rahmen- und Fertigungskonzepts.
- > Entwicklung von speziellen Elektroden-Baugruppen, die den Anforderungen an eine Elektrolyse im MW-Maßstab Genüge tun.
- > Test von preiswerten Membranmaterialien, die bereits industriell verfügbar sind.
- > Entwicklung eines modularisierbaren Elektrolysesystemkonzepts, das für den Druckbetrieb mit einem 300-kW-Elektrolysebetrieb im REG-Technikum aufgebaut wird, aber auch im 1-MW-Maßstab ohne Konzeptänderung verwendet werden kann.
- > Auslegung und Beauftragung eines Elektrolyse-Testkreislaufs für den Test von kritischen Komponenten und ganzen Baugruppen.
- > Auslegung und Beauftragung eines neuen effizienten Gleichrichtersystems für Elektrolyseblöcke mit variabler Zellzahl und Zellflächen von 0,1 bis ca. 1 m².
- > Ausarbeitung und Verifikation eines Elektrolyse-Simulationsmodells zur thermischen Auslegung der Gesamtanlagen-Balance-of-Plant und zur Auslegung der Kanalsysteme von Elektrolysezellen und -blöcken.

// Advancement of alkaline electrolysis technology

During the first twelve months of the three-year project “P2G Electrolysis”, funded by the German Federal Ministry for the Environment, the focus was, amongst other topics, on the following technical development efforts geared towards the construction of a 300-kW demonstration system:

- > Development of a concept for an electrolysis unit for pressurised operation with a nominal pressure of 25 bar. At the same time, the development of alternative concepts for the low-cost production of two-component cell frames without separate sealing elements and an electrode surface area of 3,000 cm².
- > Selection of the best frame and production concept.
- > Development of special electrode assemblies that meet the requirements for MW-scale electrolysis.
- > Test of low-cost membrane materials that are readily available in the industry.
- > Development of a modular electrolysis system concept for the pressurised 300-kW electrolysis operation in the REG technical lab, and which can also be used in the 1-MW scale without any changes in its concept.
- > Design and commissioning of an electrolysis test circuit for testing critical components and complete assemblies.
- > Design and commissioning of a new efficient rectifier system for electrolysis units with a variable number of cells and cell surface areas ranging from 0.1 to approx. 1 m².
- > Planning and verification of an electrolysis simulation model for the thermal design of the overall balance of plant and the configuration of the duct systems in electrolytic cells and units.



// Abb. links: Erste Auslegungsrechnungen für den Druckbetrieb mit einem Konzeptentwurf.
// Fig. left: First design calculations for pressurised operation of a concept design.

// Abb. rechts: Erster Konzeptentwurf eines Zwei-Stoff-Zellrahmens im verbauten Zustand.
// Fig. right: First concept design of a two-component cell frame in its installed state.

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

// Mehr Kraftstoff aus Biomasse durch Wasserstoff

More fuel from biomass with hydrogen

// Mehr Kraftstoff aus Biomasse durch Wasserstoff

Auch in einem postfossilen Zeitalter werden weiterhin kohlenstoffbasierte Kraftstoffe (C-Fuels) in verschiedenen Nutzungssektoren (z. B. Flugverkehr, Lkw-Langstrecke, Schifffahrt) benötigt. Die einzige erneuerbare Energie, die Kohlenstoff enthält, ist Biomasse. Mit den konventionellen Verfahren ist es jedoch nicht möglich, 100 % des Kohlenstoffs in einen C-Fuel zu überführen, da der Wasserstoffanteil in der Biomasse limitiert ist. Für die hocheffiziente Erzeugung von C-Fuels ist daher eine „Verlängerung der energetischen Reichweite“ der limitierten Biomasseressourcen erforderlich.

Ein vielversprechender Ansatz ist hierbei die Biogaserzeugung und die thermochemische Konversion von Biomasse (z. B. Vergasung) in Kombination mit Elektrolyse-Wasserstoff aus regenerativem Strom. Die Biomasse wird als C-Quelle eingesetzt und kann im Biogasprozess oder bei der Vergasung mittels Biomass-to-Gas (BtG) in Kombination mit Power-to-Gas (P2G[®]) / Gas-to-Liquids (GtL) in kohlenstoffhaltige Endenergieträger wie Methan (CH₄), höhere Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) und Alkohole bzw. Ether (C_xH_yO_z) umgewandelt werden. Der auf die Anbaufläche bezogene Ertrag an C-Fuels kann im Fall der anaeroben Biogaserzeugung nahezu verdoppelt werden. Im Fall der Biomassevergasung ist eine Verdreifung des Energieertrags möglich. Die in der Abbildung hellgelb bzw. hellviolett dargestellten Zusatzerträge sind auf die H₂-Einkopplung in die Biomasse-Konversionspfade zurückzuführen. Das führt zu einer drastischen Reduktion des Agrarflächenbedarfs für biomassebasierte Kraftstoffe.

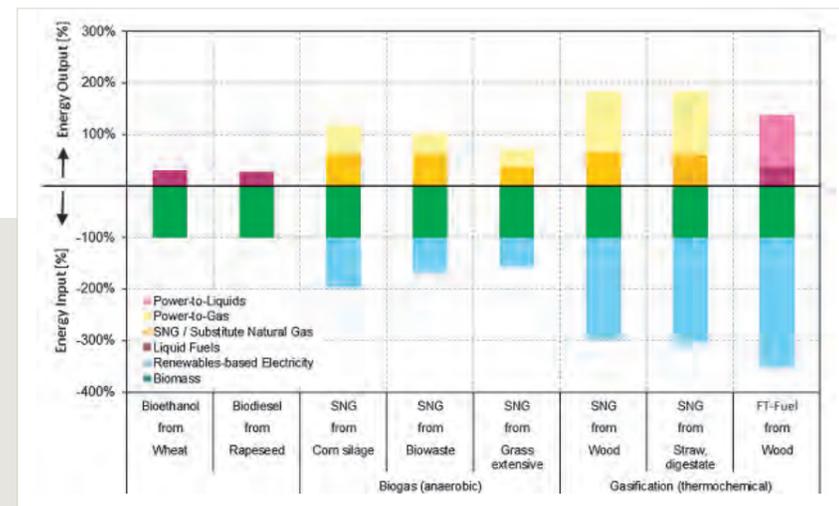
// More fuel from biomass with hydrogen

Even in a post-fossil age, carbon-based fuels (C-fuels) are still required in a number of sectors (e.g. aviation, long-distance lorry traffic and shipping). The only renewable energy source that contains carbon is biomass. With conventional methods, however, it is not possible to convert 100% of the carbon into a C-fuel, as the hydrogen content in biomass is limited. Therefore, an “extension of the energy range” of the limited biomass resources is required for highly efficient production of C-fuels.

A promising approach here is biogas production and the thermochemical conversion of biomass (e.g. gasification) in combination with electrolysis hydrogen generated with renewable electricity. Biomass is used as a carbon source and in the biogas process or during gasification using biomass to gas (BtG) in combination with Power-to-Gas (P2G[®])/gas to liquids (GTL), it is converted to carbon-based energy carriers such as methane (CH₄), higher hydrocarbons (C_xH_y) and alcohols or ethers (C_xH_yO_z). The yield of C-fuels per cultivated area can be almost doubled in the case of anaerobic biogas production. In the case of biomass gasification, it is possible to triple the energy yield. The additional yields, shown in bright yellow and purple in the chart, are due to H₂ coupled into the biomass conversion paths. This leads to a drastic reduction in the agricultural area required for biomass-based cultivation.

Die Entwicklung des Konzepts „innovative Biomassenutzung“ wurde vom Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg finanziell gefördert.

The “innovative use of biomass” concept development was funded by the Baden-Württemberg Ministry of Rural Affairs and Consumer Protection.



// Aufwand und Ertrag verschiedener Bioenergiepfade unter Einkopplung von EE-Strom (hellblau) bei der Erzeugung kohlenstoffbasierter Kraftstoffe (C-Fuels) aus Biomasse.

// Effort and yield of different bioenergy paths that couple renewable electricity (light blue) into the production of carbon-based fuels (C-fuels) using biomass.

// Contact

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

// Power-to-Gas (P2G[®])

Power-to-Gas (P2G[®])

// Power-to-Gas (P2G[®])

Das maßgeblich am ZSW entwickelte P2G[®]-Konzept sieht vor, überschüssigen Strom aus fluktuierenden Quellen mittels Elektrolyse zu Wasserstoff und in einer anschließenden Synthesestufe mit CO₂ zu Methan umzusetzen (Methanisierung). Durch die Umwandlung von Strom zu Gas wird Sonnen- und Windenergie im Erdgasnetz über Monate speicherbar.

Am Fachgebiet REG erfolgen die Technologieentwicklung und das Basic Engineering für P2G[®]-Anlagen. Im Rahmen eines vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes wird seit Ende 2012 eine 250-kW_{el}-Anlage am ZSW betrieben. Im Sommer 2013 gelang dort mit der Herstellung von besonders hochwertigem Gas ein bedeutender Erfolg: Mit 99%igem Methananteil erreichten die Forscher eine Gasqualität, die den Gaseinspeise-Richtlinien mehr als Genüge tut. Möglich wurde das durch eine Membrantechnologie, mit deren Hilfe das Gas nach der Methanisierung aufbereitet wird.

Ebenfalls im Sommer 2013 konnte das ZSW auf einen weiteren Meilenstein bei der Entwicklung des Power-to-Gas-Konzepts verweisen: Mit Hilfe des Fachgebiets REG hat ein Automobilkonzern im niedersächsischen Werlte die weltweit erste Power-to-Gas-Anlage im industriellen Maßstab eingeweiht. Die Ende 2013 erfolgte Inbetriebnahme der 6-MW_{el}-Anlage ist ein direktes Ergebnis der langjährigen Forschung, Entwicklung und Demonstration des P2G[®]-Verfahrens am ZSW. Unsere Wissenschaftler und Ingenieure unterstützten die Errichtung und Inbetriebnahme der Anlage; zudem fließen die Erfahrungen aus dem Forschungsbetrieb der Stuttgarter 250-kW_{el}-Anlage direkt in das Projekt des Autobauers ein. Dieser bietet das in Werlte erzeugte umweltfreundliche Methan als Kraftstoff für seine Erdgasautos an.

// Power-to-Gas (P2G[®])

The P2G[®] concept, significantly developed at ZSW, aims to convert excess electricity from fluctuating sources into hydrogen by means of electrolysis, which is then converted into methane in a subsequent synthesis step (methanisation) by combining the hydrogen with CO₂. By converting electricity to gas, solar and wind power become storable in the natural gas network for several months.

The REG research department develops technology and works on basic engineering for P2G[®] plants. A 250-kW_{el} plant has been in operation at ZSW since the end of 2012 as part of a project funded by the German Federal Ministry for the Environment. The summer of 2013 saw the successful production of very high quality gas. With a methane content of 99%, the researchers achieved a gas quality that exceeds statutory requirements for gas feed-in. This was made possible by a membrane technology used to process the gas after methanisation.

In the summer of 2013, ZSW was able to reach another milestone in the development of the Power-to-Gas concept: with the support of the REG research department, an automotive company opened the world's first industrial scale Power-to-Gas plant in Werlte, Lower Saxony. The commissioning of the 6-MW_{el} plant at the end of 2013 is a direct result of the many years spent researching, developing and demonstrating P2G[®] at ZSW. Our scientists and engineers supported the construction and commissioning of the plant; in addition, the experience gained from research carried out on the 250-kW_{el} plant in Stuttgart went directly into the project of the car manufacturer who offers the eco-friendly methane produced in Werlte as fuel for its natural gas vehicles.



// Methanisierung der e-gas-Anlage in Werlte.
// Methanisation in the e-gas plant in Werlte.

// Contact

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Neue Aktivmaterialien

25 Jahre Materialforschung bilden die Basis für unser umfangreiches Verständnis über Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien (wie z. B. Hochvoltspinellen, Lithiumübergangsmetallphosphaten und -silikaten) und Anodenmaterialien (wie z. B. optimierten Kohlenstoffmodifikationen, Titanaten und Legierungsanoden) für Lithium-Ionen-Batterien, wird intensiv an neuen Elektrolytsystemen mit speziellen Additiven und an Elektrodenmaterialien für zukünftige Systeme wie Lithium/Schwefel und Lithium/Luft geforscht.

Zellfertigungstechnologien

Im ZSW-Labor für Batterietechnologie (eLaB) werden seit 2010 Zellen im Format 18650 und 2-Ah-Pouchzellen für Forschungszwecke hergestellt. Darüber hinaus können angepasste vorindustrielle Prozessentwicklungen für leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Batterien generiert werden. Zellen mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und eine Zyklenstabilität von > 12.000 Zyklen. Ein Fokus liegt derzeit auf der Prozessierung von Hochenergieelektroden mit wässrigen Bindersystemen.

Post-mortem-Analysen

Zur Schadensanalyse und für die Bewertung neuer Zellen sind wir auf Post-mortem-Analysen spezialisiert. Die Analyseergebnisse sind essenziell für das Verständnis von Alterungsprozessen, potenziellen Sicherheitsrisiken und für die Zelldesignoptimierung.

Das Forschungsteam besteht aus einem internationalen, hochmotivierten Team von über 50 Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern aus Chemie, Physik und Materialwissenschaften. Hauptaufgaben sind die Entwicklung praxisrelevanter neuer Energiespeichersysteme und der Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis.



// Contact

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

// Our main focus

New active materials

25 years of material research provide the basis for our comprehensive understanding of the interrelationship between structure and powder morphology on the one hand and the desired function and processing properties on the other. In addition to new cathode materials such as high-voltage spinels, lithium transition metal phosphates and silicates, anode materials such as optimised carbon modifications, titanates and alloy anodes for lithium-ion batteries, new electrolyte systems with special additives and electrode materials are being researched for future systems such as lithium/sulphur and lithium/air.

Cell production technologies

Since 2010, cells in the 18650 format and 2-Ah pouch cells have been produced at the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB) for research purposes. In addition, adapted pre-industrial process developments can be realised for more powerful components for future batteries. Cells produced with self-developed electrodes show a very high reproducibility and a cycle stability of > 12.000 cycles. A current focus is on processing high-energy electrodes with aqueous binder systems.

Post-mortem analysis

We are specialised in post-mortem analyses for analysing damage and assessing new cells. The analytical results are essential for understanding ageing processes and potential safety risks and for optimising cell design.

The research team consists of an international, highly motivated team of over 50 scientists, engineers and technicians from the chemistry, physics and material sciences fields. The main tasks are to develop new energy storage systems relevant to practice and the practical application of research results.

// Elektrodenfertigung für Lithium-Ionen-Batterien

Electrode production for lithium-ion batteries



// Contact

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

// Material- und Prozessentwicklung für neuartige kleinformatige, gewickelte Lithium-Ionen-Zellen

Die Herstellung von Elektrodenfolien für Lithium-Ionen-Batterien basiert auf einer komplexen Prozesskette mit zahlreichen Einflussgrößen. Wichtige Prozessschritte sind die Partikelvorbehandlung, Pastenentwicklung, Beschichtung und Schichtverdichtung. Die massentaugliche Produktionstechnik für die Herstellung hochqualitativer Elektroden mit sehr kleinen Fehlertoleranzen stellt eine Schlüsseltechnologie für die industrielle Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen dar.

Ziel des vom Finanz- und Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts ist die Aufklärung der Wirkzusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Prozessparametern aus Pastenherstellung und Beschichtungsprozess sowie den mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften von Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien. Auf der Basis dieser Erkenntnisse soll die komplette Prozesstechnik zur vorindustriellen Herstellung von Elektrodenfolien mit sehr hoher Reproduzierbarkeit entwickelt werden. Um die zeitnahe Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse in industrielle Fertigungstechniken zu gewährleisten, werden Prozesssicherheit und Elektrodenqualität in neuartigen Kleinstwickelzellen in einem seriennahen Produktionsverfahren evaluiert.

Die Projektergebnisse sollen für die Entwicklung neuartiger Produkte, für einen möglichst direkten Transfer in die Serienproduktion sowie zur Identifizierung und Entwicklung kostengünstiger Produktionstechnologien großer Lithium-Ionenspeicher für die Elektromobilität oder Zwischenspeicherung von regenerativ erzeugtem Strom genutzt werden.

// Material and process development for innovative, small-format, wound lithium-ion cells

The manufacture of electrodes for lithium-ion batteries is based on a complex process chain with numerous influencing variables. Important process steps include the particle pre-treatment, paste development, coating and layer densification. Techniques suitable for mass production for manufacturing high-quality electrodes with very small error tolerances present a key technology for the industrial production of lithium-ion cells.

The aim of the project, which is funded by the Baden-Württemberg Ministry of Finance and Economics, is to determine the interrelationships between the material properties, process parameters from the paste manufacture and coating process and the mechanical and electrochemical properties of electrodes for lithium-ion batteries. Based on this knowledge, the intention is to develop the complete process technology for the pre-industrial production of electrode films with a very high reproducibility. In order to ensure the rapid transfer of the research findings into industrial production techniques, the process safety and electrode quality are being evaluated in innovative, miniature wound cells as part of a near-series production process.

The project results will be used for developing innovative products, for a rapid and direct transfer into series production and for identifying and developing cost-effective production technologies for large lithium-ion storage systems, for electromobility or for temporarily storing renewably generated power.

”



// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens

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

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

// Elektrolyte mit verbessertem Sicherheitsverhalten

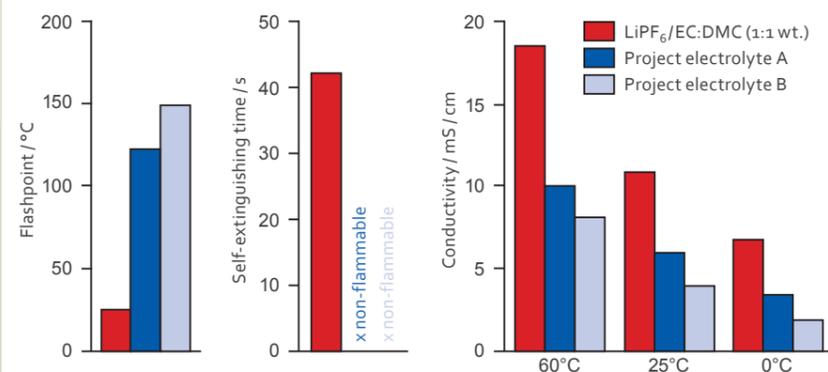
Electrolytes with an improved level of safety

// Elektrolyte mit verbessertem Sicherheitsverhalten

Seit 2011 arbeitet das ZSW gemeinsam mit namhaften Industrieunternehmen im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekts „EiSiBatt“ an der Entwicklung von eigensicheren Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ und LiFePO_4 ; sie zählen zu den sichersten heute verfügbaren Elektrodenmaterialien. Einen Schwachpunkt im Sicherheitsverhalten stellt in dieser Zelle der Elektrolyt dar – sofern der auf „klassischen“ Formulierungen von LiPF_6 in Mischungen mit organischen Carbonaten basiert.

Aufgabe des ZSW ist es, im genannten Projekt Elektrolyten mit verbesserter Sicherheit zu identifizieren. Durch den Einsatz neuer Lösungsmittel konnten Elektrolytmischungen entwickelt werden, die sich durch verringerten Dampfdruck und einen erhöhten Flammpunkt bzw. verringerte Entflammbarkeit auszeichnen und dabei für die geplanten stationären Anwendungen ausreichende Leitfähigkeiten aufweisen (siehe Grafik). Darüber hinaus werden auch andere Konzepte erprobt, wie z. B. die Verwendung von ionischen Flüssigkeiten oder von Elektrolytadditiven, die flammhemmend wirken oder vor Überladung schützen.

Am ZSW steht ein umfangreich ausgestattetes Elektrolytlabor zur Verfügung. Neben Instrumenten zur Bestimmung von elektrochemischer Stabilität, Leitfähigkeit, Dichte, Viskosität, Dampfdruck, Flammpunkt und SET (self-extinguishing time) sowie elektro-analytischen Methoden unter Verwendung rotierender Scheiben- und Ring/Scheiben-Elektroden kommen Ex-situ- und In-situ-FTIR- und Raman-Spektroskopie zum Einsatz. Abgerundet wird das Portfolio durch chromatographische und thermo-analytische/kalorimetrische Verfahren.



// Flammpunkte, SET (für 0,5-g-Probe und 3 s Zünddauer) und Leitfähigkeiten von ausgewählten Elektrolyten.
 // Flash points, SET (for 0.5-g sample and 3 s ignition opening time) and conductivities of selected electrolytes.

// Contact

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

// Exzellenzzentrum Elektrochemie: Li-EcoSafe

Electrochemical Excellence Centre: Li-EcoSafe

// Entwicklung kostengünstiger und sicherer Lithium-Ionen-Batterien – vom Material bis zur Betriebsstrategie

Das ZSW koordiniert seit Mitte 2013 ein Exzellenz-Zentrum für Batterieforschung, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb der Förderinitiative „Excellent Battery“ gefördert wird. In dem Verbundprojekt „Li-EcoSafe“ arbeiten insgesamt mehr als 20 Wissenschaftler des ZSW, der Universität Ulm und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gemeinsam daran, Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuganwendungen weiterzuentwickeln. Ziel des Vorhabens ist die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien entlang der kompletten Entwicklungslinie vom Material bis hin zur Betriebsstrategie.

Die Betriebs- und Versorgungssicherheit sowie die Umweltverträglichkeit sollen durch Verwendung neuer sicherer und verfügbarer Elektrodenmaterialien und durch eine Erhöhung der Stabilität der Elektroden/ Elektrolytgrenzflächen erreicht werden. Zur Charakterisierung der Materialien, Grenzflächen und Sicherheit sollen neue analytische Methoden entwickelt werden. Die Komplexität der Fragestellungen erfordert eine koordinierte multidisziplinäre Herangehensweise, die durch die enge Kooperation von Forscherinnen und Forschern aus Chemie, Elektrochemie, Materialwissenschaft, Theorie und Systemtechnik gewährleistet wird.

// Development of cost-effective and safe lithium-ion batteries – from the material to the operating strategy

Since the middle of 2013, ZSW has been coordinating a Centre of Excellence for Battery Research, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) as part of its “Excellent Battery” funding initiative. In the joint “Li-EcoSafe” project, a total of more than 20 scientists from ZSW, Ulm University and the German Aerospace Centre (DLR) are working together on further developing lithium-ion batteries for vehicle applications. The aim of the project is to increase the reliability and safety of lithium-ion batteries along the entire development line from the material to the operating strategy.

It is intended to achieve operating and supply security as well as environmental compatibility by using new, safer and easily available electrode materials and by increasing the stability of the electrodes and electrolyte boundary layers. The intention is also to develop new analytical methods for characterising the materials, boundary layers and safety aspects. The complexity of the issues requires a coordinated, multidisciplinary approach that is ensured through close cooperation of researchers from the chemical, electrochemical, material science, theoretical and system engineering fields.



// Contact

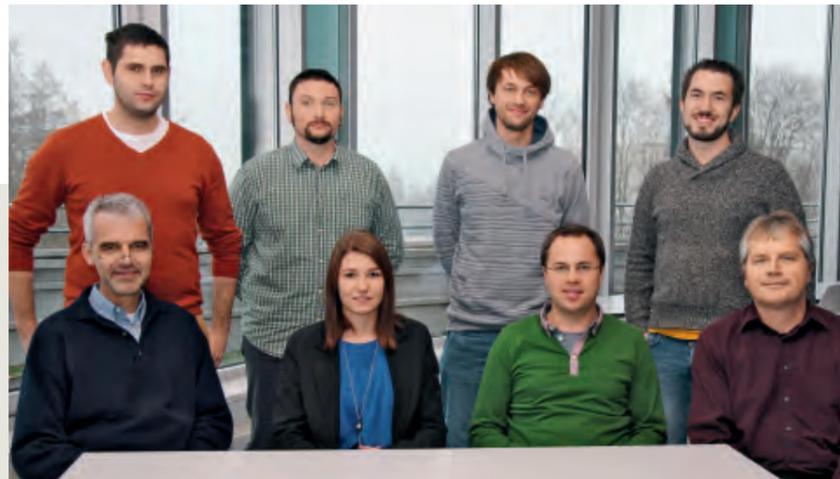
Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens
 E-mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de
 Phone: +49(0)731 95 30-612

// Produktionsforschung (ECP) Production Research (ECP)

// Unsere Kernkompetenzen

Seit Mitte 2012 fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zusammen mit dem Ministerium für Finanzen und Wirtschaft (MFW) des Landes Baden-Württemberg den Aufbau und die Infrastruktur für eine „Forschungsproduktionslinie für Li-Ionen-Zellen (FPL)“. Dies beinhaltet die Erweiterung des eLaB-Gebäudes (MFW) sowie die Anschaffung und den Aufbau von Anlagen (BMBF) zur Herstellung von großformatigen Li-Ionen-Zellen (für Elektrofahrzeuge und dezentrale Stromspeicher). Das Projekt dient einem der strategischen Ziele der Bundesregierung, die Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen in Deutschland auszubauen. Damit verbunden war auch der Aufbau des Fachgebietes Produktionsforschung (ECP). Kernaufgaben sind zunächst die Baukoordination sowie der Anlagenaufbau und die Inbetriebnahme. Ab 2014 beginnt der Einzug in das neue Gebäude. Anschließend werden im Rahmen von Industrieraufträgen seriennahe Produktionsprozesse von (großen) Li-Ionen-Zellen optimiert oder fortschrittliche Zellchemie in großformatigen Standardzellen verifiziert. Die Forschungsthemen umfassen alle produktionsnahen Fragestellungen, von der Anlagenentwicklung bis zu den erforderlichen Qualitätssicherungsverfahren.

Das hochqualifizierte und erfahrene Team wird künftig auf Basis des Betriebs der FPL auch über wichtige Beratungskompetenz bezüglich Fertigungstechnologie und Kostenbetrachtungen bei der Li-Ionen-Zellenfertigung verfügen. Das Team besteht aus einer guten Mischung von Technikern, Ingenieuren und Elektrochemikern und spiegelt so die Kompetenzen des ZSW für die neuen Aufgabenstellungen.



// Contact
Wolfgang Brugger
E-mail: wolfgang.brugger@zsw-bw.de
Phone: +49 (0) 711 78 70-826

// Our main focus

In mid-2012, the large-scale “Research production line for lithium-ion cells (FPL)” project began, which is funded by the Federal Ministry of Education and Science (BMBF) and the Ministry of Finance and Economics (MFW) of the state of Baden-Württemberg. The project includes the extension of the eLaB building (MFW) as well as the procurement and commissioning of facilities (BMBF) for the production of large-format lithium-ion cells (for electric vehicles and decentralised electricity storage systems). The project meets one of the strategic objectives of the German federal government, which is to enable the production of lithium-ion cells in Germany. In parallel the Production Research department (ECP) was established. The initial focus is on coordinating the installation, setting up the plant and commissioning it. As of 2014, with the move to the new building, work will be started on optimising the “almost” industrial scale production processes of (large) lithium-ion cells and verifying advanced cell chemistry in large-format standard cells, all in the context of industrial contracts. The research topics include all production-related issues from process development to the required quality assurance procedures.

Based on the operation of the research production line, the highly qualified and experienced team will also provide important consultancy expertise in manufacturing technology and cost assessment of lithium-ion cell production. The team consists of a good mix of technicians, engineers and electrochemists, underlining ECP’s competence for the new tasks.

// Aufbau von Produktionsanlagen Installation of production facilities

// Aufbau von Produktionsanlagen für Lithium-Ionen-Zellen

Für die Unterbringung der industrienahen Produktionsanlagen war eine Erweiterung des 2011 fertiggestellten eLaB erforderlich. Der vierte, neue, 57 m lange, 19,55 m breite und 13,6 m hohe Gebäudeteil besteht aus drei Etagen mit einer Nutzfläche von insgesamt 3.600 m² sowie Außenanlagen für die Gasversorgung und Materiallager.

Im Untergeschoss werden die Anlagen für die Herstellung der Elektrodenpasten sowie die komplette Medien- und Energieversorgung für die Fertigungsanlagen untergebracht. Das Erdgeschoss wird von der doppelstöckigen Beschichtungsanlage und einem Kalender dominiert. Im Obergeschoss wird in einem 200 m² großen Trockenraum die voll automatisierte Zellfertigung platziert. Das letzte Glied des Zellfertigungsprozesses, die Befüll- und Formieranlage, wird direkt im Anschluss an die Zellfertigung in einem 70 m² großen sauerstoffreduzierten Raum aufgebaut. Die für die Charakterisierung der Zellen erforderlichen Prüffelder und die chemische und physikalische Analytik sind in den drei bestehenden Gebäudeteilen untergebracht (siehe Abb. unten). In allen Produktionsräumen wird großer Wert auf anlagenintegrierte Sicherheitskonzepte gelegt, um nach der Inbetriebnahme eine effiziente und sichere Produktion von großen Li-Ionen-Zellen unter seriennahen Bedingungen gewährleisten zu können.



// Das ZSW-Labor für Batterietechnologie (eLaB) wird um den im Bild linken Gebäudeteil erweitert.
// Extension of the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB) shown on the left in the picture.

”



// Wolfgang Brugger

Mit der Forschungsproduktionslinie machen wir den nächsten Schritt zur anwendungsorientierten Umsetzung von Forschungsergebnissen. Industriepartner können bei uns unter seriennahen Bedingungen große Lithium-Ionen-Zellen herstellen.

With the research production line, we are taking the next step towards an application-oriented implementation of research results. Industrial partners can manufacture large lithium-ion cells in near-series conditions in our facilities.

// ZSW-CAD-Konstruktion einer prismatischen Wickelzelle nach DIN-Standards (PHEV-1-Design).
// ZSW CAD construction of a prismatic coil cell according to DIN standards (PHEV 1 design).

// Installation of production facilities for lithium-ion cells

To accommodate the industry-scale production facilities, the eLaB – which was completed in 2012 – had to be extended. The fourth, new 57 m long, 19.55 m width and 13.6 m high building consists of three floors with a total floor space of 3,600 m² and outdoor facilities for gas supply and material storage.

The basement floor houses the equipment for the production of electrode pastes as well as the entire process media and power supply facilities for the production line. The ground floor is dominated by the twin-storey coating machine and calender. The upper floor accommodates fully automated cell production in a 200-m² drying room. The final step of the cell manufacturing process, the filling and formation facility, will be located adjacent to cell production in a 70-m² low-oxygen room. The test facilities required to characterise the cells and the chemical and physical analysis systems are housed in the three existing buildings (see figure below). Great emphasis is put on system-integrated safety concepts in all production rooms to ensure the efficient and reliable production of large lithium-ion cells under near-series conditions.

// Produktionstechnologie für Hochleistungs-Li-Ionen-Zellen

Production technology for advanced Li-ion cells

// Produktionstechnologie für Hochleistungs-Li-Ionen-Zellen

Marktentwicklung Lithium-Ionen-Batterien

Die Speicherung von elektrischer Energie stellt eine der Schlüsseltechnologien für das 21. Jahrhundert dar und gehört zu den bedeutendsten wissenschaftlichen, gesellschaftlichen und volkswirtschaftlichen Herausforderungen. Die in den Batterien verbauten elektrochemischen Zellen sind ein entscheidendes Element des Gesamtsystems und haben einen signifikanten Wertschöpfungsanteil. Studien zufolge dürfte das Marktpotenzial allein für Batterien in der Elektromobilität dann zwischen 15 und 50 Mrd. Euro liegen. Derzeit dominieren asiatische Batteriehersteller den Markt für fahrzeugtaugliche Batterien. Angesichts der Chancen für die deutsche Automobilindustrie ist es jetzt wichtig, die Anstrengungen von Wirtschaft und Politik, Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter für die Elektromobilität zu etablieren, konsequent fortzuführen. Deutschland befindet sich bei der Fertigung dieser Schlüsseltechnologie noch am Anfang, ist sich aber der Bedeutung für die zukünftige Wettbewerbsposition seiner Industrie bewusst.

Erfolgsfaktor Aktivmaterialien

Neben den dargestellten ökonomischen Aspekten sind auf dem Weg zur Elektromobilität gegenwärtig noch große technische Herausforderungen zu bewältigen. Nur durch optimale Abstimmung von Batterie und Fahrzeug können fahrzeugrelevante Anforderungen wie niedrigere Kosten, verbesserte Reichweite (Energiedichte) und Zuverlässigkeit zum Markterfolg der Elektroautos führen. Der Schlüssel dafür sind Lithium-Ionen-Zellen mit innovativen Aktivmaterialien, die ihre Qualität in realen Zellen, wie sie im Fahrzeug zum Einsatz kommen, unter Beweis gestellt haben. Dazu muss das Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten verstanden und überprüft werden.

Prozessentwicklung und Produktionstechnik für große Lithium-Ionen-Zellen

Die serienmäßige Produktion großer Zellen stellt besondere Anforderungen an die Sicherheit und Genauigkeit der Prozesse. Je höher Qualität und Reproduzierbarkeit werden, desto zuverlässiger, langlebiger und kostengünstiger wird der Speicher für ein Elektrofahrzeug. Bisher gibt es in Deutschland nur begrenzt Detailkenntnisse über die Qualitätsanforderungen an die einzelnen Prozessabschnitte für große Lithium-Ionen-Zellen. Es besteht noch großer Forschungs- und Entwicklungsbedarf insbesondere zu Inline-Sensorik, Fertigungstoleranzen oder kosteneffizienten Abläufen.

Entwicklungsplattform für die Industrie

Mit der Forschungsproduktionslinie (FPL) werden ab 2015 seriennahe Fertigungsprozesse von großen prismatischen Zellen mit einer Kapazität von mehr als 20 Ah und Außenmaßen nach DIN-Standards auf industriellem Niveau erforscht und weiterentwickelt. Neue Materialien und Komponenten können dann im Hinblick auf Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Umfeld evaluiert werden. Es entsteht eine vorwettbewerbliche Entwicklungsplattform, die den seriennahen Gesamtproduktionsprozess abbildet. Durch den modularen Anlagenaufbau können Unternehmen und Forschungsorganisationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette neue Aktivmaterialien, Verfahren und Anlagenkomponenten in einer prozesssicheren Testumgebung erproben, ohne in eine kommerzielle Zellproduktion einzugreifen. Unabhängige produktionstechnologische Untersuchungen, beispielsweise an innovativen Komponenten, Prozessen und Qualitätssicherungsmaßnahmen können in einem seriennahen Herstellungsprozess, durchgeführt werden.

Leistungsmerkmale der ZSW Forschungsproduktionslinie (FPL)

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

Performance features of the "Research Production Line (FPL)"

- > Mixing stations for slurry preparation, 60-l batches, thermostatically controlled, automatic weighing and loading for a variety of materials and locally separated anode and cathode batches.
- > Electrode coating on both sides, 500mm coating width, 20 m/min production speed with various application systems and a precision calender.
- > Fully automated linking of the processes, winding, assembly and filling of prismatic cells, with cycle times of at least 1 cell per minute.
- > 200-m² drying room (dew point -60 °C) for testing new assembly technologies.
- > Full automatic formation with 900 tempered cycle stations and 2,000 storage stations.

// Production technology for advanced lithium-ion cells

Lithium-ion battery market development

Storage of electrical energy is one of the key technologies of the 21st century and one of the most important scientific, social and economic challenges. The electrochemical cells integrated in the batteries are a core element of the overall system and play a significant role in the added value. According to recent studies, the market potential of batteries in electric mobility alone is between 15 and 50 billion euros. Currently, Asian battery manufacturers dominate the market for vehicle-compatible batteries. Given the opportunities for the German automotive industry, it is important to consistently keep up the efforts made by the industry and by politics to establish and maintain Germany as a leading market and leading provider for electric mobility. Germany is just starting to get into this key technology, but is aware of its importance for the future competitive situation of the country's industry.

Success factor: active materials

Aside from the economic aspects mentioned, major technical challenges need to be overcome on the path towards electric mobility. Only through optimal alignment of battery and vehicle can vehicle-related requirements such as lower cost, improved range (energy density) and reliability lead to the market success of electric vehicles. Lithium-ion cells, with innovative active materials that have proven their performance in real cells such as they are used in vehicles, are the key to this success. For this purpose, the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology must be understood and examined in terms of quality, safety and production costs.

Process development and production technology for large lithium-ion cells

The series production of large cells places considerable demands on the safety and precision of the processes involved. The higher the quality and reproducibility, the greater the reliability, durability and cost-effectiveness of the storage systems for electric vehicles. So far, Germany has only limited detailed knowledge about the quality requirements for the individual process steps used for large lithium-ion cells. There is still substantial need of research and development, in particular regarding in-line sensor technology, manufacturing tolerances and cost-effective processes.

Development platform for the industry

Starting 2015, a near-series production line for large prismatic cells with capacities greater than 20 Ah and external dimensions according to DIN standards will be developed on an industrial scale using the new research production line (FPL). New materials and components can then be evaluated in terms of their processability and quality in an industrially relevant environment. This creates a pre-competitive development platform that encompasses the entire near-series production process. The modular plant structure enables companies and research organisations to test new active materials, processes and system components in a reliable test environment along the entire value chain. Independent research on production technology themselves, for example on innovative components, processes and quality assurance can be measured within in a near-series manufacturing process.

// Vollautomatisierte Zellmontage.
// Fully automatic cell assembly.



// Contact

Rainer Stern

E-mail: rainer.stern@zsw-bw.de

Phone: +49 (0) 711 78 70-518

// Akkumulatoren (ECA) Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Wir untersuchen und entwickeln elektrochemische Energiespeichersysteme. Damit Akkumulatoren auch unter schwierigsten Bedingungen sicher und leistungsfähig sind, stehen ihre Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung oder in Unfallsituationen sowie die Entwicklung von Methoden des Batteriemangements im Mittelpunkt unserer Arbeiten. Die Einsatzbereiche der Batterien umfassen die stationäre Energiespeicherung in elektrischen Netzen und in portablen Geräten genauso wie in elektrifizierten Antriebssträngen für die Elektromobilität.

Batterietest und Sicherheitstest

Im elektrischen Batterietest werden Zellen, Module und Systeme auf Funktionalität geprüft, ihre Leistungsfähigkeit vermessen und die zu erwartende Lebensdauer unter definierten Belastungen und Umgebungsbedingungen bestimmt. Mittels zerstörerischer Tests können wir die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilen.

Batteriesystemtechnik

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



// Contact

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

// Our main focus

We research and develop electrochemical energy storage systems. To ensure that accumulators are safe and efficient even under the most extreme conditions, our work focuses on characterising them under various operating conditions, investigating their behaviour with regard to operating errors and accident situations as well as developing battery management methods. The batteries' applications include stationary energy storage in electric networks and in portable devices as well as in electrified drive trains for electro-mobility.

Battery test and safety test

The electric battery test serves to investigate the functionality of cells, modules and systems, measure their performance and determine their expected service life under defined loads and environmental conditions. With abuse tests, we can assess the reactions and potential risks of accumulators when there is extreme damage as well as the resistance of accumulators relative to various abuse conditions and operating errors.

Battery system technology

The main focus of battery system technology is thermal and electrical modelling and the simulation of cells and battery systems. In addition to developing modules and battery management systems (BMS), we perform research activities on model-based algorithms to determine the state of the battery (state of charge and ageing), predict system performance and ensure optimal charge control and energy management. The goal is dynamic, reliable and efficient operation of the storage system in the mentioned applications.



// Batteriesystemtechnik Battery system technology

// Batteriesystemtechnik

Exemplarisch für die Arbeit der Batteriesystemtechnik steht das in diesem Jahr erfolgreich abgeschlossene, vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt LiANA+ unter der Führung eines Industrieunternehmens. Ziel des Projekts war die Entwicklung von großen elektrischen Speichern zum Einsatz in dieselelektrisch angetriebenen Zügen. Im Unterschied zu Automobilanwendungen werden dafür eine höhere Zyklenzahl und Lebensdauer gefordert sowie andere Maßstäbe an Sicherheit und Zuverlässigkeit angelegt. Durch die Hybridisierung des Antriebs unter Verwendung eines Lithium-Ionen-Speichers ist eine wesentliche Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs erzielt worden. Darüber hinaus konnten durch den Betrieb des Dieselmotors an seinem optimalen Arbeitspunkt die Emissionen deutlich gesenkt werden.

Aufgabe des ZSW war dabei die Charakterisierung der ausgewählten Zellen und der im Projekt entwickelten Module hinsichtlich Performance, Lebensdauer und Sicherheit. Auf Basis von validierten dynamischen elektrothermischen Modellen der Zelle wurden Algorithmen für die Zustandsschätzung (Ladezustand und Alterung) und die Leistungsprognose der gesamten Batterie in Matlab/Simulink entwickelt, simuliert und optimiert. Die Software wurde im nächsten Schritt kompiliert und in das Batteriemangementsystem implementiert. Das Zusammenspiel des elektrischen Speichers unter Einsatz des echtzeitfähigen und laufzeitoptimierten Codes im Batteriemangementsystem mit dem hybridisierten, dieselelektrischen Antriebsstrang wurde letztlich im Testbetrieb beim Unternehmen validiert.

// Teilelektrifizierung von dieselgetriebenen Zügen mittels Lithium-Ionen-Batterien als ein Mittel zur Emissionsreduktion und Energieeinsparung.
// Partial electrification of diesel-powered trains by means of lithium-ion batteries as a means of emission reduction and energy saving.

// Battery system technology

An example for the battery system technology efforts is the project LiANA+, funded by the German Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi) under the leadership of an industrial company, which was successfully completed this year. The aim of the project was the development of large electrical storage systems for use in diesel-electric trains. In contrast to automotive applications, a higher number of cycles and a longer service life are required along with different standards of safety and reliability. Due to the hybridisation of the drive train with a lithium-ion battery, a substantial reduction in fuel consumption has been achieved. Moreover, by running the diesel engine at its optimum operating point, emissions were significantly reduced.

ZSW's task was to characterise the selected cells and modules developed during the project in terms of performance, durability and safety. On the basis of validated dynamic, electro-thermal models of the cell, algorithms for state estimation (state of charge and lifetime) and performance prediction of the entire battery were developed, simulated and optimised in Matlab/Simulink. The software was then compiled and implemented in the battery management system. The interaction of the electric storage system with the real-time and runtime-optimised code in the battery management system with the hybridised, diesel-electric train drive was ultimately validated through test operation carried out at the company.



// Batteriemangementsystem mit laufzeitoptimierter Applikationssoftware zur Zustandsbestimmung für 2 Stränge mit je 9 Modulen à 14 Zellen.

// Battery management system with runtime-optimised application software for determining the state of two strings each with nine modules and 14 cells per module.

// Contact

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

// Sicherheitsaspekte von Batterien

Safety aspects of batteries



// Elektrische Batterietests

Electrical battery testing



// Sicherheitsaspekte von Batterien für mobile Anwendungen

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

Für die Gefahrenklassifizierung werden unterschiedliche Missbrauchsuntersuchungen (mechanisch, elektrisch, thermisch) durchgeführt. Drei Testbunker mit entsprechender Abgasbehandlung und Brandlöscheinrichtungen stehen für die Ausführung von Sicherheitsuntersuchungen an Batterien zur Verfügung. Unsere Spezialisierungen sind mechanische Tests (Nageltest, quasistatische Quetschuntersuchungen), thermische Tests (Brandtests, thermische Stabilitätsuntersuchungen) und elektrische Tests (Kurzschluss, Überladung, Überentladung). In diesem Jahr sind zudem weitere Anlagen für mechanische Sicherheitstests im Bereich Vibration und Schock (Shaker/Shocker) in Betrieb genommen worden.

// Safety aspects of batteries in mobile applications

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

Different abuse tests are carried out in order to make a hazard potential classification (mechanical, electrical and thermal). Three bunkers with corresponding waste gas treatment and fire extinguishing systems are available for safety investigation of batteries. We specialise in mechanical impact tests (nail penetration and quasi static crush), thermal testing (fire exposure and thermal stability) and electric tests (short circuit, overcharge and over discharge). This year, further facilities for mechanical safety tests in the area of vibration and shock (shaker/shocker) have been put into operation as well.



// Vorbereitung und Durchführung von Sicherheitstests (Nageltest).
// Preparation and performance of safety tests (Nail-Penetration testing).



// Contact

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

// Elektrische Untersuchung von Zellen, Modulen und Batteriesystemen

Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens von Batterien werden Zellen, Module und Hochvoltpeicher Performance- und Lebensdauertests unterzogen. Die realitätsnahe Charakterisierung von Batterien und die Überprüfung der Funktionalität des Batteriemagementsystems (BMS) erfolgen mittels anwendungsspezifischer Prüfpläne zur Erfassung des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Belastung. Zur Verfügung steht eine Vielzahl an Testkanälen mit unterschiedlichen Leistungsklassen von Kleinzellen bis zu Hochvoltspeichern. Zur Simulation der thermischen Umgebung werden Klimakammern verschiedener Größen bis hin zur befahrbaren Kabine für Elektrofahrzeuge eingesetzt.

Die Testkapazitäten für elektrische Batterietests umfassen umfangreiche Zellprüfkanäle mit unterschiedlichen Spannungs- und Stromklassen bis zu 1.000 V und 600 A. Die Prüfkanäle sind zur Erhöhung der Stromklasse zum Teil parallelisierbar. Alle Prüfungen und Tests erfolgen automatisiert, wobei die Prüflinge in entsprechenden Temperaturkammern in separat geschützten Prüfräumen untergebracht werden. Erhöhte Sicherheit im Batterietestfeld gewährleisten Teststände mit einer unabhängigen Überwachungseinheit, in die auch eine mobile Feuerlöscheinrichtung integriert werden kann. Im Berichtsjahr wurde das Testportfolio um kombinierte Tests erweitert, die über die rein elektrischen Tests in einer Temperaturumgebung hinausgehen. So wurde z. B. eine neuartige Messmethode etabliert, mittels derer die Expansion während des Zyklisierens aufgenommen werden kann. Des Weiteren wurde der Zyklentest an Zellen mit Leckage mit einer Gasanalyse verknüpft.

// Electrical investigation of cell, modules and battery systems

To characterise the electrical properties, performance capability and ageing behaviour of batteries, the cells and modules undergo performance and service lifetime tests. To characterize batteries as realistic as possible and to validate the functionality of battery management systems (BMS) application specific test plans are used that record the electrical load profiles. A diverse range of test channels are available for this purpose with different performance classes, ranging from small cells to high-voltage storage systems. To simulate the thermal environment, climate chambers in various sizes have been procured along with drive-in cabins for electric vehicles.

The test capacities for electrical battery tests currently comprise approximately 150 test channels with voltage and current classes up to 1000 V and 600 A. The test channels can be partly parallelised to increase the current class. All verifications and tests are computer controlled, whereby the test samples are housed in corresponding temperature chambers in separately protected test rooms. Test rigs with an independent monitoring unit, in which a mobile fire extinguisher device can also be integrated, ensure increased safety in the battery test field. In the reporting year, the test portfolio was expanded to include combined tests that go beyond the purely electrical tests in a controlled temperature environment. For example, a new type of measurement was established recording expansion during cycling. Furthermore, the cycle test for cells with leakage was linked to gas analysis.



// Zell-Performance.
// Cell performance.

// Contact

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Materialien für die nächste Generation von Brennstoffzellen
Flüssige Brennstoffe wie Alkohole für die Konversion in Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellensystemen (PEMFC) sind aus Gründen der Brennstofflogistik und wegen ihrer Energiedichte attraktiv. Durch die komplexen elektrochemischen Vorgänge an der Alkoholelektrode sind die Leistungsdaten alkoholbetriebener Zellen allerdings geringer als die wasserstoffbetriebener Zellen. Im Fokus der experimentellen Arbeiten stehen Arbeiten an neuen Funktionsmaterialien (Membranen, Elektrokatalysatoren etc.), die Entwicklung neuer Konzepte für Elektroden, Membran-Elektrode-Anordnungen etc. sowie die Bestimmung der Beständigkeit von Dichtungen oder Bipolarplatten. Darüber hinaus wird an verbesserten Betriebsstrategien für Alkoholbrennstoffzellen gearbeitet.

Technologien für neue Energiespeicherkonzepte

Die effiziente Speicherung von elektrischer Energie wird zur zentralen Herausforderung der sicheren Energieversorgung in den kommenden Jahren. Dabei rücken Verfahren wie beispielsweise die Redox-Flow-Zellen, Metall-Luft-Zellen oder effiziente Hochleistungsspeicher mit wässrigen Elektrolyten wieder in den Fokus der Forschungsarbeiten. Die Erzeugung des Sekundärenergieträgers Wasserstoff über Elektrolyse gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Wasserstoffqualität ist von entscheidender Bedeutung für die Lebensdauer und die Betriebssicherheit von Brennstoffzellensystemen. Für all diese Themen sind neue Aktivmaterialien und neue Zellkonzepte von zentraler Bedeutung.

Unser Team verfügt über rund 25 Jahre Erfahrung mit elektrochemischen Energiewandlern und über die entsprechende Infrastruktur und Möglichkeiten, neue technologische Ansätze schnell im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren.



// Contact

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

// Our main focus

Materials for the next generation of fuel cells

The use of alcohols as a fuel for the conversion in polymer electrolyte membrane fuel cell systems (PEMFC) is attractive not just in terms of the fuel logistics but also the energy density. As a result of the complex electrochemical processes at the alcohol electrode, alcohol-powered cells have lower power densities than hydrogen-operated cells. Our experimental work focuses on investigating new function materials (membranes, electro catalysts, etc.), developing new concepts for electrodes, membrane electrode arrangements, and so forth, as well as determining the durability of sealing and bipolar plates. Moreover, we are working on concepts for an optimised operating strategy.

Technologies for new energy storage concepts

The efficient storage of electrical energy will become a central challenge facing energy supplies in the next few years, whereby the focus will be on new topics such as redox flow cells, metal-air cells as well as high power storage elements using aqueous electrolytes. The generation of hydrogen as a secondary energy carrier by means of electrolysis will become increasingly important. New active materials and new cell concepts will play a central role with all these topics. In addition, hydrogen quality is of crucial importance with regard to lifetime and reliability of fuel cell systems.

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

// Optimierte Membran-Elektroden-Anordnungen (MEA)

Optimised membrane electrode assemblies (MEA)

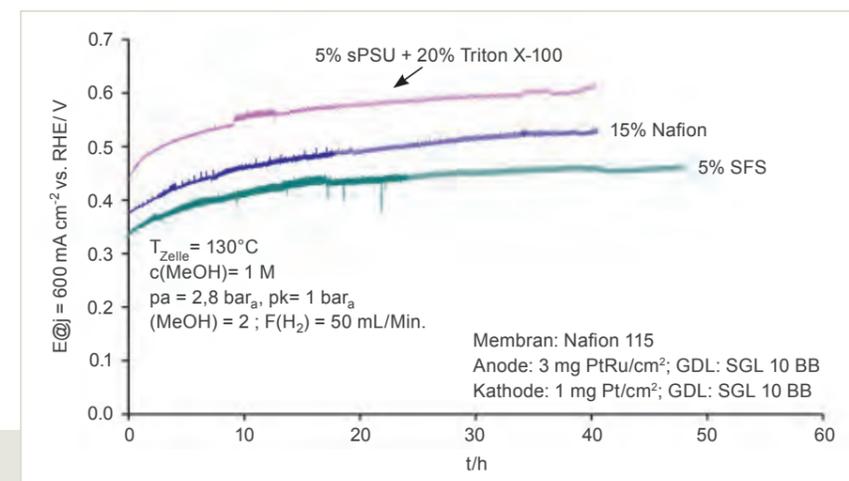
// Optimierte Membran-Elektroden-Anordnungen (MEA) mit neuen Bindern

Die MEA bildet das Kernstück der Brennstoffzelle. Optimale Transporteigenschaften, Stabilität und Anbindung der Elektrode an die Elektrolytmembran sind von ausschlaggebender Bedeutung. Das gilt vor allem für gasentwickelnde Elektroden, wie z. B. die Anoden einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC). Darüber hinaus ist die Leistungsfähigkeit der Zellen von der Betriebstemperatur und vom Aufbau der Katalysatorschicht abhängig. Wegen der starken Quellung des üblicherweise verwendeten Nafion-Ionomers in methanolhaltigen Lösungen und der daraus resultierenden Gefahr der Zerstörung der Katalysatorschicht wurden weniger lösliche Ionomere wie sulfoniertes Polysulfon (sPSU) und teilfluorierte sulfonierte Polyether (SFS) in der Katalysatorschicht mit Blick auf Schichtqualität und Leistungsdaten untersucht. Durch die Optimierung der Zusammensetzung der Katalysatorsuspensionen konnte für beide Ionomere eine gute Haftung auf der Elektrolytmembran erreicht werden. Anoden mit sPSU und SFS als ionomerem Binder zeigten eine sehr feinporige Mikrostruktur. Im Anoden-Aktivitätstest mit Nafion 115-Elektrolytmembran wurde mit SFS die beste Aktivität gefunden.

// REM-Bilder von DMFC-Anoden mit verschiedenen Binderionomeren: a) Nafion, b) sPSU und c) SFS.
// SEM-images of DMFC anodes using different ionomers as binders: a) Nafion, b) sPSU, and c) SFS.

// Optimised membrane electrode assemblies (MEA) with new binder

The core part of the fuel cell is made from MEA. Optimum transport properties, stability and bonding to the electrolyte membrane are of prime importance. Gas evolving electrodes such as the Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) anode are a particular challenge for the electrode microstructure. In addition, cell performance, is strongly dependent on the operating temperature, the composition and microstructure of the anode catalyst layer. Nafion shows strong swelling in solutions containing methanol at elevated temperatures, making the catalyst layer mechanically instable. Therefore, less soluble ionomers such as, sulfonated Polysulfone (sPSU) and partially fluorinated sulfonated Polyether (SFS) have been investigated as alternative ionomeric binders with respect to layer quality and DMFC anode performance. Their performance was compared to Nafion. Optimisation of the catalyst ink led to good adhesion of the catalyst layer to the Nafion membrane. Anodes using sPSU and SFS as ionomer binders showed a much finer porous microstructure. In anode activity tests, using a Nafion 115 membrane anodes with SFS as ionomer binder showed the best performance.



// Verlauf des Anodenpotentials von MEAs mit Nafion-, sPSU- und SFS-Ionomer.
// Anode potential of MEAs using Nafion, sPSU, and SFS ionomer binder in the anode.

// Dr. Ludwig Jörissen

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

Our work focuses on new materials and components for fuel cells, electrolyzers, high power storage elements and metal-air cells.

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

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymer-elektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC)-Technologie. Kernkompetenzen sind Konstruktion, Charakterisierung und Simulation von Brennstoffzellen und Komponenten, der Bau von Prototypen und die Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien. Der Leistungsbereich unserer Entwicklungen von PEMFC-Komponenten und -Stacks beginnt bei wenigen Watt und erstreckt sich bis zu 100 kW_{el}. Wir optimieren Brennstoffzellen hinsichtlich Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von Herstelltechniken und die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks sowie automobiltaugliche Brennstoffzellen.

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können wir mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimieren. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels modernster Simulationssoftware ein. Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden und Gasverteilerstrukturen mittels einer μ -CT-Anlage validiert. Mit dieser Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden. Ergänzend verfügen wir über gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte und durchgeführte Verfahren im Bereich der Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Visualisierung von Abläufen in Komponenten, Zellen und Stacks. Diese Technologien ermöglichen zeitliche und räumliche Auflösungen, die zu den weltweit besten Werten gehören.



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

// Our main focus

The research department is specialised in the development of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) technology. Core areas of expertise are design, characterisation and simulation of fuel cells and components, the construction of prototypes, and the development of production and test technologies. The power output range of our PEMFC component and stack developments starts at a few watts and extends up to 100 kW_{el}. We optimise output, service life, efficiency and compactness of fuel cells. This also involves researching and estimating ageing processes and failure analyses. We also focus on developing manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks and fuel cells suitable for vehicles.

Modelling and simulating processes in fuel cells allow for the rapid optimisation of component structures and operating conditions. This includes the development and establishment of novel approaches using advanced simulation software. The simulation results are verified with appropriately adapted hardware and reality-based experiments. For example, water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layer is validated using an μ -CT system. With this system, gas diffusion layers, including their water content, can also be examined under compressed conditions. In order to visualise processes in components, cells and stacks, we also use technologies involving neutron and synchrotron radiography and tomography that we have jointly developed, and now conduct, with the Helmholtz Centre Berlin (HZB). These technologies enable temporal and spatial resolutions that are amongst the best in the world.

// Wassermanagement in Brennstoffzellen

Water management in fuel cells

// Transportprozesse an der GDL-MPL-Grenze und Katalysatorträgerstabilität

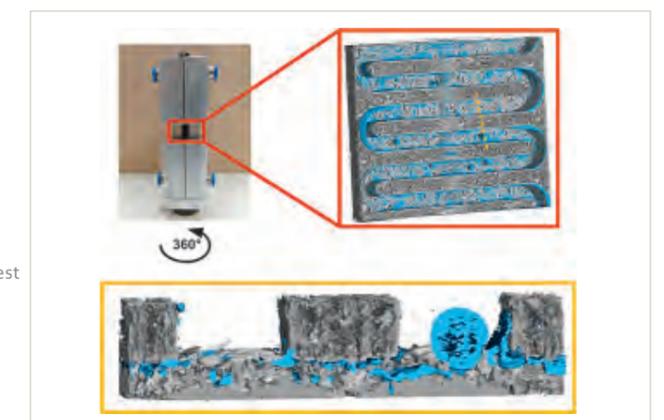
Zum tiefgehenden Verständnis der komplexen Transportprozesse in den Gasdiffusionslagen (GDL) der Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle ist die Kenntnis der GDL-Morphologie sowie der GDL-Oberflächeneigenschaften wesentlich. Dazu werden im Rahmen des laufenden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts hochauflösende GDL-Tomogramme mit Röntgenstrahlen aufgenommen. Dabei werden Bilder mit einer Pixelauflösung von rund 440 nm/pixel erzeugt. Bei der Analyse werden sowohl große Freiräume zwischen den Fasern als auch kleinere Poren in der mikroporösen Schicht und dem Bindermaterial sichtbar. Weiterhin wird das auf den Fasern und in der mikroporösen Schicht enthaltene PTFE (Polytetrafluorethen) detektiert, da es die Oberflächeneigenschaft von hydrophil zu hydrophob ändert. Mit der PTFE-Detektion und der Kenntnis der GDL-Morphologie ist es möglich, Anlagerungen von Wasser an der Materialoberfläche genau vorherzusagen. Das geschieht anhand von Monte-Carlo (MC)-Simulationen, die auf den Tomographiedaten aufbauend gerechnet werden. Zur Validierung der MC-Simulationen wird der Wasserhaushalt der GDL während des Brennstoffzellenbetriebs untersucht. Dazu kommen spezielle Miniatur-Brennstoffzellen zum Einsatz, die eine Identifikation von kleinsten Wasseransammlungen ermöglichen. In einem weiteren Bereich des Projekts wird das Stabilitätsverhalten von alternativen Katalysatorträgermaterialien bewertet.

// Miniatur-Brennstoffzelle zur Identifikation kleinster Wasseransammlungen in den porösen Schichten.
// Miniature fuel cell for the identification of the smallest amounts of water accumulated in the porous layers.

// Querschnitt (Tomogramm) einer Gasdiffusionslage mit integrierter mikroporöser Schicht zur Identifikation von Freiräumen zwischen den Fasern und im Bindermaterial.
// Cross-section (tomogram) of a GDL with integrated microporous layer (MPL) for identification of free volume between fibres and binder material.

// Transport processes at the GDL-MPL boundary and catalyst carrier stability

For a deeper understanding of the complex transport processes taking place in the gas diffusion layers (GDL) of the low-temperature PEM fuel cell, knowledge of GDL morphology and GDL surface properties is essential. To this end, high-resolution X-ray tomograms of gas diffusion layers are taken as part of the current project funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The images created have a resolution of about 440 nm/pixel. In the analysis, both large open gaps between the fibres as well as smaller pores in the microporous layer and the binder material become visible. Furthermore, PTFE (polytetrafluoroethene) included in the fibres and in the microporous layer is detected, since it changes the surface from being hydrophilic to hydrophobic. With detection of PTFE and knowledge of the GDL morphology, it is then possible to accurately predict accumulations of water on the material's surface. This is done using Monte Carlo (MC) simulations that are calculated based on tomography data. To validate the MC simulations, the GDL water content is investigated during fuel cell operation. Special miniature fuel cells are employed that enable the identification of even the lowest quantities of water accumulation. In another area of the project, the stability behaviour of alternative catalyst carrier materials is assessed.



”



// Dr. Joachim Scholta

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

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

// Direkt-Methanol-Brennstoffzellen

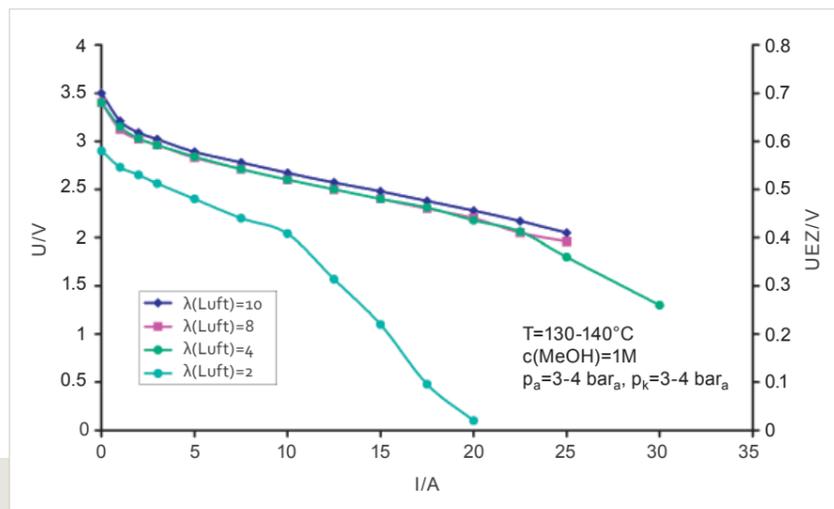
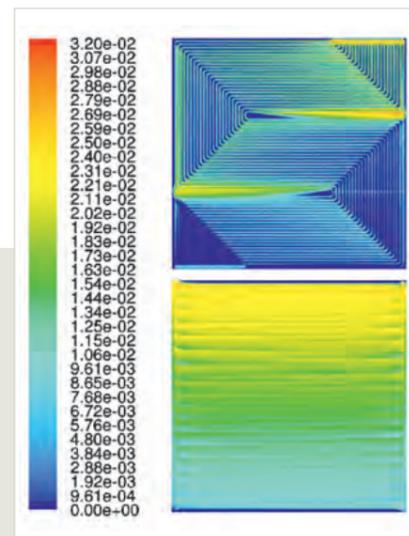
Direct Methanol Fuel Cells

// Entwicklung einer Mitteltemperatur-Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (MT-DMFC)

Im Rahmen des Projektes „Innovative Materialien und Verfahren für MT-PEM-Brennstoffzellen“ wurde ein MT-DMFC-Stack für den Betrieb bei 100-150 °C entwickelt und neben dem Endplattendesign insbesondere das Anodenflowfield optimiert. Die Leistungsdichte konnte durch das neu entwickelte Medienverteilerfeld fast verdoppelt werden. Die Flowfieldauslegung erfolgte mit Computational Fluid Dynamics (CFD). Die Berechnungen für ein Standarddesign zeigten, dass insbesondere bei hohen Stromdichten von 600 mA/cm² unterversorgte Bereiche auftraten. Deshalb wurde eine Stegbreitenvariation durchgeführt und schließlich ein optimiertes Flowfield mit geringerer Parallelisierung entwickelt. Dieses Flowfield zeigte auch bei hohen Stromdichten von 600 mA/cm² eine homogene Methanolverteilung und -abreicherung über den aktiven Bereich. Messungen zeigten eine um den Faktor von mindestens 1,7 verbesserte Stromdichte (@400 mV) bei gleichzeitig verbessertem Umsatzverhalten. Das durch CFD-Rechnungen ermittelte optimierte Design wurde in einem 5-Zell-Verifizierungsstack erfolgreich erprobt.

// Methanol-Massenanteil in der Gasverteilerschicht bei 600 mA/cm². Zufluss rechts oben, Abfluss links unten. Basisflowfield (oben), optimiertes Flowfield (unten).

// Methanol mass fraction in the gas distribution layer at 600 mA/cm². Inflow upper right, outflow lower left corner. Basis Flowfield (top), optimized Flowfield (down).



// Strom-Spannungskennlinien des 5-zelligen Direktmethanol-Verifizierungsstacks. Druckbereich 3-4 bar_a, Temperatur 130-140 °C.
// Current voltage curves of 5-cell DMFC verification stack. Operating pressure 3-4 bar_a, temperature 130-140 °C.

// 5-Zell-Mitteltemperatur-DMFC-Verifizierungsstack zum Betrieb bei bis zu 4 bar und 150 °C im Testbetrieb.

// 5-cell MT-DMFC verification stack for operation at up to 4 bar and 150 °C under test.

// Development of a medium-temperature direct methanol fuel cell (MT-DMFC)

As part of the “Innovative materials and processes for MT-PEM fuel cells” project, an MT-DMFC stack was developed for operation at 100-150 °C that optimises end plate design and, in particular, the anode flow field. The power density was almost doubled thanks to the newly developed media distribution field. The flow field was designed with the aid of computational fluid dynamics (CFD). Calculations for a standard design have shown that under-supplied areas occurred especially at high current densities of 600 mA/cm². For this reason, the rib width was varied and an optimised flow field with a lower level of parallelisation was then developed. This flow field displayed homogenous methanol distribution and depletion even with high current densities of 600 mA/cm². Measurements have shown that the current density has improved by at least a factor of 1.7 (@400 mV) with simultaneously improved conversion behaviour. The optimised design, determined through CFD calculations, has been successfully tested in a 5-cell verification stack.

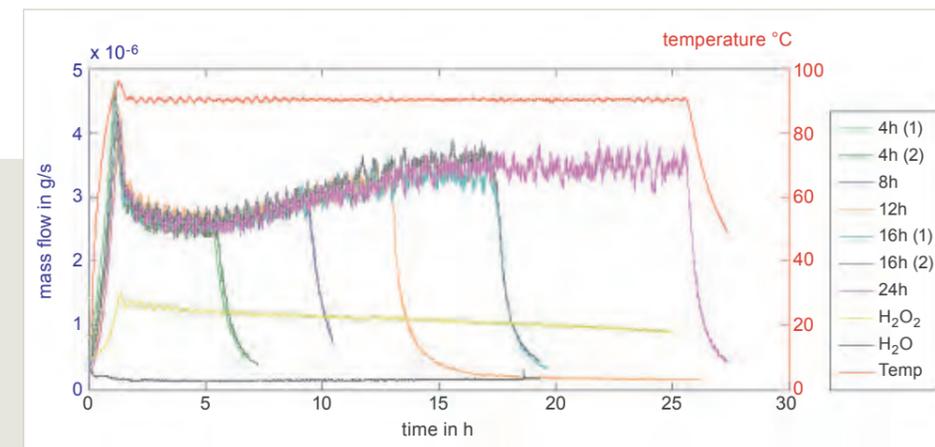
// Lebensdauerprognose

Lifetime prediction

// Lebensdauerprognose für Brennstoffzellen

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Verbundprojekt „Entwicklung von Lebensdauerprognosemodellen von Brennstoffzellen in realen Anwendungen“ hat zum Ziel, auf der Basis von Betriebsdaten und speziellen Untersuchungen Softwarewerkzeuge zu entwickeln, die die Vorhersage der zu erwartenden Lebensdauer eines PEMFC-Stacks unter gegebenen Betriebsbedingungen erlauben. Die hierbei vom ZSW bearbeiteten Fragestellungen umfassen unter anderem Detailuntersuchungen der für die Degradation relevanten physikalisch-chemischen Prozesse in der Gasdiffusionslage und der Elektrolytmembran, insbesondere auch im Hinblick auf deren Kinetik. Hierzu wurden Methoden weiterentwickelt, die eine möglichst realitätsnahe beschleunigte Alterung außerhalb der Brennstoffzelle simulieren. Eine dieser Methoden ist die Behandlung der Gasdiffusionslage mit heißem Wasserstoffperoxid, die oxidierende Bedingungen im Zellbetrieb nachstellt. Mittels des am ZSW entwickelten Aufbaus können innerhalb weniger Stunden Alterungsvorgänge nachgestellt und detailliert verfolgt werden. Als Untersuchungsmethoden dienen dabei beispielsweise die in diesem Zusammenhang entwickelte, neuartige Quantifizierung der Emission des Oxidationsprodukts CO₂ während des Experiments und die Bestimmung der Änderung des äußeren und inneren Kontaktwinkels.

Mit dem Abschluss des Projekts im Jahr 2014 wird Entwicklern, Herstellern und Anwendern von Brennstoffzellen im automobilen, stationären und portablen Bereich eine umfangreiche Software zur Analyse und Prognose von Brennstoffzellen-Alterungszuständen zur Verfügung stehen.



// Zeitlicher Verlauf der CO₂-Bildung während des Alterungsexperiments.
// Time-resolved plot of CO₂ formation during the ageing experiment.

// Aufbau der Alterungsapparatur mit integrierter CO₂-Detektion.

// Set-up for the accelerated ageing experiment equipment featuring integrated detection of CO₂.

// Lifetime prediction for fuel cells

The joint project “Development of service life prediction models for fuel cells in real-world applications”, funded by the German Federal Ministry of Economics and Energy (BMWi) aims to develop software tools based on operating data and special studies that allow the prediction of the expected service life of a PEMFC stack under specified operating conditions. The questions tackled by ZSW include detailed studies of the physical-chemical processes in the gas diffusion layer and the electrolyte membrane that are relevant to degradation, especially in terms of their kinetics. To this end, methods have been developed that simulate, as realistically as possible, accelerated ageing outside the fuel cell. One of these methods is the treatment of the gas diffusion layer with hot hydrogen peroxide, which mimics oxidising conditions during cell operation. With the system developed at ZSW, ageing processes can be reproduced in a matter of hours and traced in detail. Research methods used include a novel quantification of the emission of the oxidation product CO₂ during the experiment and determination of the change of the outer and inner contact angle.

With the conclusion of the project in 2014, a comprehensive software package for the analysis and lifetime prediction of fuel cells in automotive, stationary and portable applications will be available for developers, manufacturers and users of fuel cells.

// Contact

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

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

// Unsere Kernkompetenzen

Brennstoffzellensysteme

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

Brennstoffzellentests

Zur Charakterisierung von Brennstoffzellenstacks, -systemen und -systemkomponenten betreiben wir ein Testzentrum/Prüfstand mit 20 vollautomatisierten Testständen. Die installierten Prüfstände und die Gasinfrastruktur ermöglichen Tests bis zu Leistungen von 120 kW_{el}. In einer Kältekabine können Stacks und Systeme bis -25 °C getestet werden. Die Vollautomatisierung der Teststände erlaubt kosteneffiziente Rund-um-die-Uhr-Untersuchungen. Eine umfangreiche Analytik ermöglicht die detaillierte Bewertung von Alterungsvorgängen und ausführliche Fehleranalysen. Seit Sommer 2012 können Brennstoffzellen bis 100 kW_{el} auch nach der Norm DIN EN 62282-2 geprüft werden.

Reformer für flüssige Brennstoffe

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



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

// Our main focus

Fuel cell systems

Over 20 years of experience form the basis for the development of fuel cell stacks and systems for a wide range of applications, ranging from a few watts to 100 kW, from on-board and emergency power supplies to stationary applications and automotive systems. Our scope of services comprises complete prototypes, including controls, monitoring and hybridisation with batteries and DC/AC converters. We now support industry partners in developing and testing system components and in carrying out safety assessments, as well as packaging studies and product certification.

Fuel cell tests

In order to characterise fuel cell stacks, systems and system components, we operate a test centre/testing facility with 20 fully automated test facilities. The test benches installed and the gas infrastructure facilitate tests up to an output of 120 kW_{el}. Stacks and systems can be assessed in a cold cabin down to a temperature of -25 °C. The fully automated test benches allow for cost-efficient 24/7 operation for extended lifetime testing purposes. Large analysis systems permit detailed assessments of ageing processes and failure reports. Since the summer of 2012, fuel cells of up to 100 kW_{el} can be tested in accordance with DIN EN 62282-2.

Reformer for liquid fuels

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

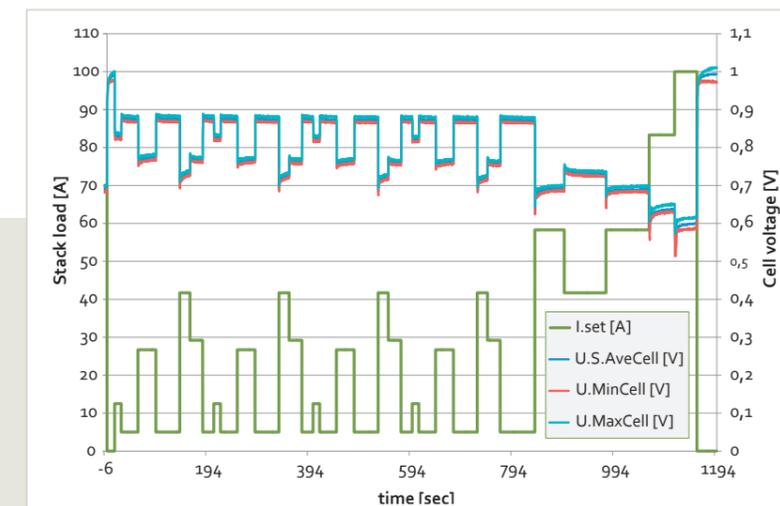
// Testprozeduren für Brennstoffzellen

Test procedures for fuel cells

// Definition und Validierung von Testprozeduren für Brennstoffzellen

Für die Markteinführung von Brennstoffzellen sind vergleichbare Testprozeduren erforderlich. In dem vom ZSW koordinierten europäischen Verbundprojekt „Stacktest“ mit elf Partnern aus Industrie und Forschung werden drei Jahre lang unterschiedliche Testprogramme zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Stacks definiert und validiert. Dafür werden Testmodule und Testprogramme entwickelt und mit Hardware unterschiedlicher Hersteller praktisch erprobt. Zur Bewertung der Lebensdauer eines Brennstoffzellen-Stacks wurde ein Stromprofil definiert, das an den europäischen Fahrzyklus „New European Driving Cycle (NEDC)“ angelehnt ist (siehe Diagramm). Wiederholte Anwendungen des Lastprofils auf einen Stack im Teststand zeigen anhand charakteristischer Lastpunkte die Leistungsentwicklung über die Betriebsdauer auf und liefern damit die Datenbasis für Lebensdauerabschätzungen. Die auch an die Partner weitergegebenen ZSW-Stacks vom Typ BZ-100 zeigten während der Abnahmeprüfungen sehr gute Homogenität und elektrische Leistungen („begin of life“). Im Rahmen des Projekts wurden weitere Testprogramme für spezifische Leistungsdaten und für Sensitivitätsuntersuchungen unterschiedlicher Betriebsparameter, Lebensdauer und Sicherheitsaspekte entwickelt und erfolgreich in den involvierten Verbundinstituten getestet.

Die Validierung der Testprozeduren erfolgte im ZSW-Brennstoffzellen-Testzentrum mit modernster und verlässlicher Test-Infrastruktur auf Brennstoffzellen-Testfeldern im Leistungsspektrum zwischen 0,1 und 100 kW. Die sicherheitsrelevanten Untersuchungen erfolgten auf Basis der Prüfnorm DIN EN 62282-2.



// Dynamisches Lastprofil.
// Dynamic load cycle.

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

// Wasserstoff-Luft-betriebener ZSW-Stack im Einsatz.
// Hydrogen-air operation ZSW stack.

// Definition and validation of test procedures for fuel cells

Comparable test procedures are required for the market introduction of fuel cells. In the European joint project "Stacktest" coordinated by ZSW and carried out with eleven industrial and research partners, different test programmes for the characterisation of fuel cell stacks are defined and validated over a period of three years. Test modules and test programmes are developed and tested in practice with hardware from different manufacturers. To evaluate the service life of a fuel cell stack, a current profile was defined that is based on the New European Driving Cycle (see the diagram below). Repeated applications of the load profile on a stack in the test rig demonstrate the performance development, based on characteristic load points, over the operating period, thereby providing the database for service life estimations. The BZ-100 ZSW stacks, which were also handed out to partners, exhibited very high uniformity and very good begin of life values during the specification tests. As part of the project, further test programmes for specific performance data and for sensitivity analyses of various operating parameters, service life and safety aspects have been developed and successfully tested by the cooperating institutes.

The test procedures were validated at the ZSW fuel cell test centre with its advanced and reliable testing infrastructure in fuel cell test benches in the range between 0.1 – 100 kW. Safety-related analyses were carried out on the basis of the testing standard DIN EN 62282-2.

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

// Unsere Kernkompetenzen

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

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

// Our main focus

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

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



// Administrationsteam Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien (GBEC)
// Administration team for the Electrochemical Energy Technologies Division (GBEC)



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



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



// Kompetenzteam Elektrik/Elektronik Ulm
// Competence Team Electric/Electronic, Ulm



// Werkstatt Ulm
// Workshop Ulm



// Team Öffentlichkeitsarbeit
// Public Relations team



// Werkstatt Stuttgart
// Stuttgart workshop



// Patentwesen und IT Ulm
// Intellectual Properties and IT, Ulm



// IT Stuttgart
// IT Stuttgart



// Öffentlichkeitsarbeit
Public Relations



**// Öffentlichkeitsarbeit
Public Relations**

Energiethemen sind komplex. Darum informieren wir Wirtschaft, Politik und Gesellschaft: nachvollziehbar und neutral. Denn nur wer eine neue Technologie versteht und bewerten kann, wird ihre Umsetzung in die Praxis unterstützen und so dazu beitragen, die Energieversorgung von morgen zu gestalten. Der folgende Rückblick vermittelt einen Eindruck von unseren Veranstaltungen und unserer Medienarbeit des Jahres 2013.

The issues we tackle are complicated. They span various industries, which is why we deliver transparent, neutral information to the economic, political and social arenas. Our reports facilitate understanding and evaluation of new technologies, which leads to support for their implementation and a greener energy supply for the future. This review will provide you with an insight into our events and public relations work in 2013.

// Wissenschaftsministerin Bauer besucht ZSW
Die Ministerin für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg, Theresia Bauer, besichtigte am 30. April das ZSW in Stuttgart. Im Fokus des Besuchs standen die ZSW-Innovationen auf den Gebieten Dünnschicht-Photovoltaik, Elektromobilität und Energiespeicherung. Ministerin Bauer zeigte sich nach den Vorträgen und der Führung durch die CIGS-Labore beeindruckt: „Hier sieht man auf anschauliche Weise, dass das ZSW hervorragende technologische Forschung betreibt.“ Die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung von Dünnschichtmodulen habe Zukunft, sagte Bauer.

// Science Minister Bauer visits ZSW
On 30 April, the Minister for Science, Research and the Arts for the Federal State of Baden-Württemberg, Theresia Bauer, visited ZSW in Stuttgart. Her visit focussed on ZSW's innovations in the fields of thin-film photovoltaics, electromobility and energy storage. Minister Bauer was visibly impressed after the introductory talks and a guided tour of the CIGS laboratories: "Here it is demonstrably shown that ZSW is carrying out excellent technological research." She said that the application-focussed research and development of thin-film modules had excellent prospects.

// Parlamentarischer Abend zur Energiewende
„Nach der Wahl: Die neue Koalition in Berlin und die Energiewende in Baden-Württemberg“ – unter diesem Motto veranstalteten die KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg und das ZSW am 6. November gemeinsam ihren Parlamentarischen Abend in Stuttgart. Vor gut 120 Zuhörern diskutierten ZSW-Vorstand Prof. Dr. Frithjof Staiß und KEA-Geschäftsführer Dr. Volker Kienzlen mit den energiepolitischen Sprechern der vier Landtagsfraktionen über die künftige Gestaltung der Energiewende im Land. Umweltminister Franz Untersteller (Grüne) hatte zuvor im voll besetzten Otto-Borst-Saal das Grußwort gesprochen.

// Parliamentary Evening on the energy turnaround
"After the election: The new coalition in Berlin and the energy turnaround in Baden-Württemberg" – this was the motto for the Parliamentary Evening in Stuttgart on 6 November, jointly organised by the Agency for Climate Protection and Energy Baden-Württemberg (KEA Baden-Württemberg) and ZSW. In front of nearly 120 listeners, ZSW Managing Director Prof. Dr. Frithjof Staiß and KEA Executive Chairman Dr. Volker Kienzlen discussed the future course of the energy turnaround in Baden-Württemberg together with the energy policy spokespersons from the four state parliamentary groups. Prior to this, Environment Minister Franz Untersteller (Green Party) had held the welcome address in the packed Otto Borst Hall.

// Die ZSW-Vorstände überreichen Ministerin Theresia Bauer eine im ZSW-Labor gefertigte Solar-Uhr.
// The ZSW Board of Directors present Minister Theresia Bauer with a solar clock produced in the ZSW laboratory.



// Parlamentarischer Abend von KEA und ZSW.
// Parliamentary Evening organised by KEA and ZSW.



// Deutschlands neue Energie: regenerativ, revolutionär – riskant?
Unter diesem Titel brachte Prof. Frithjof Staiß, Geschäftsführender Vorstand des ZSW, das Publikum der Leser-Uni der Stuttgarter Zeitung am 1. Februar auf den neuesten Stand der Energiewende. Staiß betonte im Audimax der Universität Hohenheim, dass die Chancen der Energiewende enorm seien, in der öffentlichen Debatte jedoch zumeist die Risiken diskutiert würden.

// Germany's new energy: renewable, revolutionary – risky?
This was the title of a talk given by Professor Frithjof Staiß, the Managing Director of ZSW, in which he brought the audience up to date on the energy turnaround. The lecture, which was held on 1 February at the University of Hohenheim, formed part of the "Readers' University" event organised by the Stuttgarter Zeitung newspaper for its readers. Staiß emphasised that although the energy turnaround offers enormous opportunities, the public debate has until now mainly focussed on the risks.

// Feierliche Grundsteinlegung und Richtfest im eLaB
Im Neubau wird bis Sommer 2014 eine Forschungsproduktionslinie (FPL) zur Erforschung von Produktionsprozessen im industriellen Maßstab für große Lithium-Ionen-Zellen (20 Ah) in Betrieb genommen (siehe S. 52). Das bisher aus drei Gebäudeteilen bestehende eLaB wird deshalb um einen vierten Gebäudeteil mit rund 3.600 m² erweitert. Am 29. Mai erfolgte in Ulm die feierliche Grundsteinlegung für den vierten eLaB-Gebäudetrakt (siehe S. 51). Die Bauarbeiten verliefen schneller als geplant, und nach nur vier Monaten Bauzeit wurde am 9. Oktober Richtfest gefeiert – traditionell mit Richtspruch und Richtkrone im Rohbau des neuen Gebäudes.

// Laying of the foundation stone and topping out ceremony at the eLaB
In the new building, a research production line (FPL) for researching industrial-scale production processes for large lithium-ion cells (20 Ah) will commence operation by summer 2014 (see page 52). The eLaB, which previously consisted of three building sections, is therefore being expanded with a fourth section that is roughly 3,600 m² in size. The laying of the foundation stone for the fourth eLaB section (see page 51) was held in Ulm on 29 May. The building work was faster than planned and the topping out ceremony was celebrated on 9 October after just four months of construction – with a traditional topping out speech and the hoisting of a wreath within the shell of the new building.



// Rohbau für die Forschungsproduktionslinie für Lithium-Ionen-Batterien: Fertigstellung im Sommer 2014.
// Shell structure for the research production line for lithium-ion batteries that will commence operation in summer 2014.



// Im Mai war die Grundsteinlegung für die eLaB-Gebäudeerweiterung in Ulm. ZSW-Vorstand Prof. W. Tillmetz legt mit Gästen den Grundstein in der Baugrube.
// In May, the groundbreaking ceremony for the eLaB building extension was held in Ulm. Together with guests, ZSW Board Member Prof W. Tillmetz lays the foundation stone in the excavation pit.

// Projektleiter Dr. Ulrich Zuberbühler (3. von rechts) erklärt den Landtagsabgeordneten das P2G-Verfahren im ZSW-Technikum.
 // Project head Dr. Ulrich Zuberbühler (third from right) explains the P2G process to state parliamentarians at the ZSW technical lab.



// 6. International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells (PBFC6), Ulm.
 // 6th International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells (PBFC6), Ulm.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Landtagsabgeordnete von B90/die Grünen besichtigen ZSW
 Insgesamt 14 Parlamentarier der Grünen und deren Mitarbeiter haben am 13. Mai das ZSW besucht, um sich über die Zukunft der Photovoltaik sowie der Speichertechnologie P2G® zu informieren. Unter den politischen Gästen waren auch Fraktionschefin Edith Sitzmann sowie deren Stellvertreter-Duo Andrea Lindlohr und Andreas Schwarz.

// State parliamentarians from the Green Party visit ZSW
 On 13 May, 14 members of the state parliament from the Green Party and their staff visited ZSW to find out about the future of photovoltaics and the P2G® storage technology. The political guests included Parliamentary Group Leader Edith Sitzmann and her deputies Andrea Lindlohr and Andreas Schwarz.

// Fachkongress Elektromobilität zur 65. IAA Pkw in Frankfurt am Main

Schleppende Verkäufe in Deutschland, weltweit enorme Wachstumsraten bei Elektrofahrzeugen: Allein 2012 ist der Bestand um 160% gestiegen. Angesichts der Chancen für die deutsche Automobilindustrie referierte ZSW-Vorstand Prof. Werner Tillmetz im Vorfeld der 65. Internationalen Automobil-Ausstellung IAA am 17. September auf dem VDA-Fachkongress für Elektromobilität. Die initiierten Maßnahmen sollen konsequent fortgesetzt werden, um Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter für die Elektromobilität zu etablieren. Jetzt soll eine durchgängige Wertschöpfungskette mit einer starken Zulieferindustrie etabliert werden.

// Electric mobility Conference at the 65th International Motor Show, the IAA, in Frankfurt am Main
 Sluggish sales in Germany but enormous growth rates for electric vehicles worldwide: the numbers have grown by 160% in 2012 alone. Regarding the opportunities for the German automotive industry, ZSW Board Member Prof Werner Tillmetz spoke at the VDA Conference on Electromobility that was held on 17 September ahead of the 65th International Motor Show, the IAA. He said that the measures initiated should be rigorously pursued in order to establish Germany as a leading market and leading provider of electric mobility, whereby a continuous value added chain with a strong supply industry should also be established.

// Das ZSW war 2013 auf folgenden Messen vertreten:

| | |
|---|-----------------|
| 28. Symposium für Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein | 6.–8.3.2013 |
| 21. DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte, München | 13.–14.3.2013 |
| Hannover Messe Industrie | 8.–12.4.2013 |
| 6. International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells (PBFC), Ulm | 3.–7.6.2013 |
| Intersolar Europe, München | 19.–21.6.2013 |
| 63. Nobelpreisträgertagung Lindau | 5.7.2013 |
| Roadshow zum 25-jährigen Jubiläum im Daimler Forschungszentrum, Ulm | 18.7.2013 |
| 2. World of Energy Solutions (früher f-cell), Stuttgart | 30.9.–2.10.2013 |
| 28. EU-PVSEC, Paris | 1.–3.10.2013 |

// In 2013, ZSW was represented at the following trade fairs:

| | |
|--|-----------------|
| 28 th Symposium for Photovoltaic Solar Energy, Bad Staffelstein | 6–8/03/2013 |
| 21 st DESIGN&ELEKTRONIK developer forum for batteries & charging concepts, Munich | 13–14/03/2013 |
| Hannover Industrial Trade Fair | 8–12/04/2013 |
| 6 th International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells (PBFC) | 3–7/06/2013 |
| Intersolar Europe, Munich | 19–21/06/2013 |
| 63 rd Nobel Laureate Meeting, Lindau | 5/07/2013 |
| 25 th anniversary roadshow of the Daimler Research Centre, Ulm | 18/07/2013 |
| 2 nd World of Energy Solutions (formerly f-cell), Stuttgart | 30/09–2/10/2013 |
| 28 th EU-PVSEC, Paris | 1–3/10/2013 |

// Zum 13. Mal präsentierte das ZSW Energie mit Zukunft auf der Hannover Messe

Im Themenbereich Energie beim „Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells“ stellte das ZSW modernste Energietechnologien vor. Gezeigt wurde ein mit Bio-Ethanol betriebener Stromerzeuger mit Brennstoffzelle zur netzunabhängigen Strom- und Wärmeversorgung. Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes „Sol-Ion“ wurde ein Photovoltaik-Speichersystem erfolgreich getestet, das Solarstrom mithilfe einer Batterie speichert. Aus der Brennstoffzellen-Entwicklung waren verschiedene PEM-Brennstoffzellen zu besichtigen sowie eine eigens entwickelte Stack-Testplattform „Auto-Stack-Tool“ für Fahrzeug-Brennstoffzellen.

// ZSW presents energy with a future for the 13th time at the Hanover Industrial Trade Fair

In the Energy section, ZSW presented cutting-edge energy technologies at the “Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells”. These included a bioethanol-operated electricity generator with fuel cell for providing off-grid electricity and heat. As part of the “Sol-Ion” project funded by the German Federal Environment Ministry, a photovoltaic storage system that stores solar power using a battery was successfully tested. Various PEM fuel cells resulting from the fuel cell development were also on view as well as a specifically developed stack test platform „Auto-Stack-Tool“ for automotive fuel cells.

// 6. International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells (PBFC6), Ulm

Das ZSW bildete zusammen mit dem Weiterbildungszentrum Ulm für innovative Energietechnologien e. V. (WBZU) das Organisationskomitee der 6. PBFC 2013. Beim Expertentreff wurde über Lithium-Polymer-, Lithium-Ionen-, Metall-Luft- und Flow-Batterien sowie über PEM- und alkalische Brennstoffzellen diskutiert. Die Konferenz findet alle zwei Jahre an wechselnden Orten weltweit statt und ist ein zentraler Treffpunkt für Chemiker und Physiker aus Industrie und Forschung.

// 6th International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells (PBFC6), Ulm

Together with the Education and Training Centre Ulm for Innovative Energy Technologies (WBZU), ZSW provided the organisation committee for the 6th PBFC 2013. The meeting of experts discussed lithium-polymer, lithium-ion, metal-air and flow batteries as well as PEM and alkaline fuel cells. The conference, which takes place every two years at different locations worldwide, is a central meeting place for chemists and physicists from industry and research.



// Messestand des ZSW auf der Hannover Messe.
 // ZSW booth at the Hannover Industrial Trade Fair.



// ZSW-Forscher Jann Binder diskutiert mit EU-Energiekommissar Günther Oettinger über PV-Speichersysteme mit Li-Ionen-Akku auf der Hannover Messe.
 // At the Hannover Industrial Trade Fair, ZSW researcher Jann Binder talks to EU Energy Commissioner Günther Oettinger about PV storage systems with Li-ion batteries.

// Die Doktorandinnen Serife Kaymaksiz und Katrin Seidenberger stellen in Lindau ihr Projekt zur Sicherheit von Li-Ionen-Batterien vor.
 // In Lindau, PhD Students Serife Kaymaksiz and Katrin Seidenberger present their project for securing the safety of lithium-ion batteries.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Der ZSW-Stand auf der 28. EU-PVSEC in Paris.
 // ZSW booth at the 28th EU-PVSEC in Paris.



// Intersolar Europe in München

Erstmals präsentierten die Systemtechniker des Geschäftsbereichs Photovoltaik ihre Forschungsergebnisse und Dienstleistungen im Juni auf dem Gemeinschaftsstand von Baden-Württemberg International. Besonders die Erkenntnisse zu möglichen Ertragsverlusten an Solarmodulen durch potenzialinduzierte Degradation trafen auf reges Interesse.

// ZSW stellt im Rahmen der 63. Nobelpreisträgertagung „Chemie“ seine Forschung vor

Am 5. Juli 2013 fand die Abschlussveranstaltung der 63. Lindauer Nobelpreisträgertagung mit dem Themenschwerpunkt Chemie in Lindau statt. Teilnehmer waren die Laureaten und rund 500 besonders qualifizierte und ausgewählte Nachwuchswissenschaftler aus der ganzen Welt. Auf Einladung des Staatsministeriums Baden-Württemberg stellte das ZSW ein Projekt aus dem Bereich Materialforschung zur Verbesserung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien im stationären und mobilen Einsatz vor. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojekt werden neue Elektrolyte untersucht, die die Überladung von Batterien verhindern sollen („Overcharge Protection of Li-Ion Batteries with Redox Shuttle Additives“).

// Intersolar Europe in Munich

The system technicians from the Photovoltaics Division presented their research results and services for the first time at the joint Baden-Württemberg International stand. In particular, the findings on possible yield losses from solar modules caused by potential-induced degradation aroused considerable interest.

// ZSW presents its research as part of the 63rd Nobel Laureate Meeting on chemistry

On 5 July 2013, the final event of the 63rd Lindau Nobel Laureate Meeting took place in Lindau, which this year focussed on chemistry. The delegates included the Nobel Laureates themselves and a select group of approximately 500 highly qualified young researchers from all over the world. Invited by the State Ministry of Baden-Württemberg, ZSW presented a project from the material research sector for improving the safety of lithium-ion batteries in stationary and mobile use. In the research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research, Overcharge Protection of Li-Ion Batteries with Redox Shuttle Additives, new electrolytes that are intended to prevent battery overcharging are being investigated.

// ZSW auf der World of Energy Solutions (WES) in Stuttgart

Das ZSW begleitete die f-cell-Konferenz unter dem Dach der WES in Stuttgart wie gewohnt wissenschaftlich. Zusätzlich stellte das ZSW in diesem Jahr auf der „Battery & Storage“ Speichertechnologien für die zukünftige Energieversorgung vor. Gezeigt wurden Energietechnologien für den mobilen und stationären Einsatz und ein Entwicklungswerkzeug für automobiltaugliche Hochleistungsbrennstoffzellen: das „Auto-Stack-Tool“, mit dem herstellerunabhängig Brennstoffzellen für die Automobil- und Zulieferindustrie qualifiziert bewertet werden können.

// ZSW auf der 28. EU-PVSEC in Paris

Bei der aufgrund der Marktkonsolidierung stark geschrumpften europäischen Photovoltaik-Messe EU-PVSEC in Paris erregte das ZSW am Rande der bedeutendsten PV-Konferenz im europäischen Raum viel Aufmerksamkeit mit seinen Forschungsergebnissen zu flexiblen und druckbaren Solarzellen und seinen Dienstleistungen des PV-Testlabors Solab.

// Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist nicht zuletzt aufgrund der attraktiven Themen des Instituts weiterhin erfolgreich. Insgesamt wurden 2013 rund 1.370 Presseergebnisse erzielt. Das ZSW konnte sich überregional u. a. wie folgt platzieren (Auszug):

- > Süddeutsche Zeitung: „Brandsatz im Labor“ (Batterietests, März)
- > Nature: „Germany’s Energy Gamble“ (Erneuerbare in Deutschland, April)
- > Süddeutsche Zeitung: „Unbekannte Größen“ (Stromspeicher für die Energiewende, Interview Dr. Musiol, April)
- > VDI-Nachrichten: „Forscher erhöhen das Tempo bei der Entwicklung von Solarzellen“ (CIGS-Weltrekord, Juni)
- > Süddeutsche Zeitung, Beilage LUX: „Brennstoffzellen: Praxistest erfolgreich“ (zur Brennstoffzellen-Hausenergieversorgung im Callux-Projekt, September)

Die beste Resonanz erzielten folgende Forschungsthemen:

- > ZSW stellt Weltrekord-Solarzelle her
- > Rund 16.000 Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen
- > Versorgungssicherheit im Land vorerst gewährleistet
- > Lithium-Ionen-Zellen aus Ulm mit Spitzenwerten
- > 25 Jahre ZSW: Umweltminister Franz Untersteller würdigt Erfolge des Forschungsinstituts

// ZSW at the World of Energy Solutions (WES) in Stuttgart

ZSW once again provided scientific support at the f-cell conference held under the auspices of the WES event. This year new, ZSW also presented its storage technologies for future energy supplies at the “Battery & Storage” trade fair. It presented energy technologies for mobile and stationary use and a development tool for vehicle-appropriate, high-performance fuel cells: the “Auto Stack Tool”, which makes it possible to make a qualified assessment of fuel cells for the automotive and supply industries irrespective of the manufacturer.

// ZSW at the 28th EU PVSEC in Paris

Although the European PV Solar Energy Conference and Exhibition in Paris has considerably shrunk as a result of market consolidations, ZSW attracted considerable attention at the most important PV conference in Europe, with its research results on flexible and printable solar cells and the services provided by the Solab PV testing laboratory.

// Media relations

Public relations at ZSW have enjoyed continued success due to the Institute’s appealing topics, if nothing else. Around 1,370 results in press coverage were realised in 2013. Articles relating to ZSW appeared in the following national publications (excerpt):

- > Süddeutsche Zeitung: “Fire brand in the laboratory” (battery tests, March)
- > Nature: “Germany’s Energy Gamble” (renewables in Germany, April)
- > Süddeutsche Zeitung: “Unknown quantities” (electricity storage systems for the energy turnaround; interview Dr. Musiol, April)
- > VDI-Nachrichten: “Researchers increase the tempo with the development of solar cells” (CIGS world record, June)
- > Süddeutsche Zeitung, LUX supplement: “Fuel Cells: Practical test successful” (on the use of fuel cells for supplying domestic energy in the Callux project, September)

The best response was generated by the following research topics:

- > ZSW produces world record solar cell
- > Around 16,000 electric vehicles on Germany’s roads
- > Supply security in Germany ensured for the time being
- > Lithium-ion cells from Ulm with top values
- > 25 years of ZSW: Environment Minister Franz Untersteller praises success of the research institute



// Stand der PV-Systemtechniker auf der Intersolar Europe in München.
 // The PV system technicians’ booth at Intersolar Europe in Munich.



// Forschungsministerin Theresia Bauer informiert sich bei Dr. Ludwig Jörissen am ZSW-Stand auf der Battery & Storage (WES).
 // Research Minister Theresia Bauer speaks with Dr. Ludwig Jörissen at ZSW booth at the Battery & Storage trade fair (WES).

// 25 Jahre ZSW: Feier mit symbolischem Spatenstich begangen

Das 25-jährige Bestehen des Instituts wurde am 16. Oktober mit zahlreichen Gästen aus Politik, Wirtschaft und Verbänden feierlich gewürdigt. Die Veranstaltung war zugleich ein Fest für alle Mitarbeiter aus Stuttgart, Ulm und Widderstall, die mit ihren Fähigkeiten, Erfahrungen und Ideen die Erfolgsgeschichte des ZSW erst möglich gemacht haben.

In den späten 1980er Jahren – Europa stand unter dem Eindruck der zweiten Ölpreiskrise und der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl – erstarkte das Interesse an einer nachhaltigeren Energieversorgung. In Baden-Württemberg gründeten daher im Jahr 1988 die Landesministerien für Wirtschaft und Wissenschaft, die Universitäten Stuttgart und Ulm, das DLR sowie sieben weitere Firmen und Verbände das ZSW als gemeinnützige Stiftung des öffentlichen Rechts.

Bei der Jubiläumsfeier im Festsaal des Stuttgarter Engineering Park (STEP) kamen nach der Begrüßung durch Prof. Frithjof Staiß zunächst die prominenten Politiker des Landes zu Wort. Umweltminister Franz Untersteller (Grüne), SPD-Fraktionschef Claus Schmiedel und Stuttgarts Oberbürgermeister Fritz Kuhn (Grüne) lobten vor knapp 400 Zuhörern die Impulse, die vom ZSW für die

Energiewende ausgehen, und hoben die innovativen Technologien und Konzepte des Instituts hervor.

An der Meitnerstraße in Stuttgart-Vaihingen, wo ab Herbst 2014 mit Unterstützung des Landes Baden-Württemberg sowie der Landeshauptstadt Stuttgart der Institutsneubau des ZSW entstehen soll, erfolgte anschließend der symbolische Spatenstich durch die Festredner und Bauherren – mit einem rund vier Meter langen Spaten. Das neue Gebäude soll ausreichend Büro- und Technikumsflächen bieten. Im jetzigen Institutsgebäude in der Industriestraße wird es bereits eng; schließlich hat sich die Mitarbeiterzahl am Stuttgarter ZSW in den vergangenen acht Jahren von knapp 70 auf 113 Mitarbeiter erhöht.

Im weiteren Verlauf der Festveranstaltung sprach der frühere Kuratoriumsvorsitzende Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht über „25 Jahre Energieforschung am ZSW: Forschung für eine nachhaltige Zukunft“. Prof. Albrecht bot den Gästen, vor allem den jüngeren ZSW-Mitarbeitern, mit seinem Rückblick spannende Einblicke in die ZSW-Historie. Unter dem Titel „Zukünfte“ referierte anschließend Prof. Jörg Aldinger über das Wohnen und Arbeiten im Jahre 2035. Der Architekt präsentierte kühne Ausblicke auf bevorstehende Herausforderungen und deren Lösungen.

// 25 years of ZSW: Celebration with a symbolic groundbreaking ceremony

On 16 October, the 25th anniversary of the institute was officially celebrated with numerous guests from politics, business and associations. At the same time, the event was a celebration for all members of staff from Stuttgart, Ulm and Widderstall who, with their skills, experience and ideas, have made the ZSW success story possible.

During the late 1980s, Europe was marked by the second oil price crisis and the Chernobyl nuclear disaster, which increased the interest in sustainable energy supplies. Therefore in 1988, the Baden-Württemberg Ministries for Economic Affairs and Science, the Stuttgart and Ulm universities, the DLR as well as seven other companies and associations founded ZSW as a non-profit foundation under public law.

Following the welcome address by Frithjof Staiß at the official anniversary celebration, which was held in the Main Hall at Stuttgart Engineering Park (STEP), prominent politicians from the regional state were given an opportunity to speak. In front of nearly 400 listeners, Environment Minister Franz Untersteller (Green Party), SPD Parliamentary Group Leader Claus Schmiedel and Stuttgart's Mayor Fritz Kuhn (Green Party) praised the im-

petus provided by ZSW for the energy turnaround and highlighted the institute's innovative technologies and concepts.

Using a roughly four-metre-long spade, the speakers and builders then carried out a symbolic groundbreaking ceremony at Meitnerstrasse in Stuttgart-Vaihingen. This is where, with the support of the Federal State of Baden-Württemberg and the state capital of Stuttgart, ZSW's new institute building will be built from autumn 2014. The new building is designed to provide sufficient office and technical lab space. The current institute building in Industriestraße is already becoming somewhat cramped, with the number of people working at ZSW's Stuttgart base having increased from nearly 70 to 113.

Later on during the celebrations, the former Chairman of the Board of Trustees, Prof. Dr.-Ing. Hans Albrecht, spoke on "25 years of energy research at ZSW: research for a sustainable future". With his review, Albrecht provided the guests, particularly the younger ZSW members of staff, with an exciting look back at ZSW's history. Under the title "Futures", Prof. Jörg Aldinger then talked about living and working in the year 2035, whereby the architect described the exciting challenges as well as solutions that lie ahead.



// 25 Jahre ZSW: Fest im Saal des Stuttgarter Engineering Park (STEP).
// 25 years of ZSW: Official celebrations in the Main Hall at Stuttgart Engineering Park (STEP).



// Beim symbolischen Spatenstich: ZSW-Vorstände Tillmetz und Staiß sowie Oberbürgermeister Kuhn, STEP-Geschäftsführer Blum, SPD-Fraktionschef Schmiedel, ZSW-Vorstand Powalla und Architekt Froesch (v.l.n.r.).
// At the symbolic groundbreaking ceremony: ZSW Board Members Tillmetz and Staiß as well as Mayor Kuhn, STEP Managing Director Blum, SPD Parliamentary Group Leader Schmiedel, ZSW Board Member Powalla and Architect Froesch (f.l.t.r.).



// Mit rasantem Percussion-Spiel heizte die Gruppe „Drums & More“ ein.
// The band "Drums & More" set the tempo with their fast-pace percussion playing.



// Umweltminister Franz Untersteller (Grüne), SPD-Fraktionschef Claus Schmiedel und Stuttgarts Oberbürgermeister Fritz Kuhn (Grüne).
// Environment Minister Franz Untersteller (Green Party), SPD Parliamentary Group Leader Claus Schmiedel and Stuttgart's Mayor Fritz Kuhn (Green Party).



// Gelegenheit zu angeregten Unterhaltungen mit Kollegen und Wegbegleitern aus Wirtschaft und Politik.
// Opportunity for lively conversation with colleagues and partners from business and politics.



// Dokumentation
Documentation

// Finanzielle Entwicklung Financial development



// Einnahmen – Ausgaben

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 40,2 Mio. Euro und damit deutlich über dem Wert des Vorjahres. Wesentliche Ursache war, dass hohe Einnahmen aus öffentlichen Zuwendungen für den Aufbau der Forschungsproduktionslinie für Lithium-Ionen-Zellen in Ulm eingingen.

Das ZSW konnte sich international als eine der führenden Forschungseinrichtungen für Batterietechnologien etablieren und steigende Erträge aus Auftragsforschungen und aus öffentlichen Forschungszuwendungen generieren. Die Einnahmen aus der Auftragsforschung erreichten mit 9,2 Mio. Euro einen neuen Höchststand und lagen +19 % deutlich über dem Vorjahreswert. Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2013 um 0,1 Mio. Euro auf 4,1 Mio. Euro.

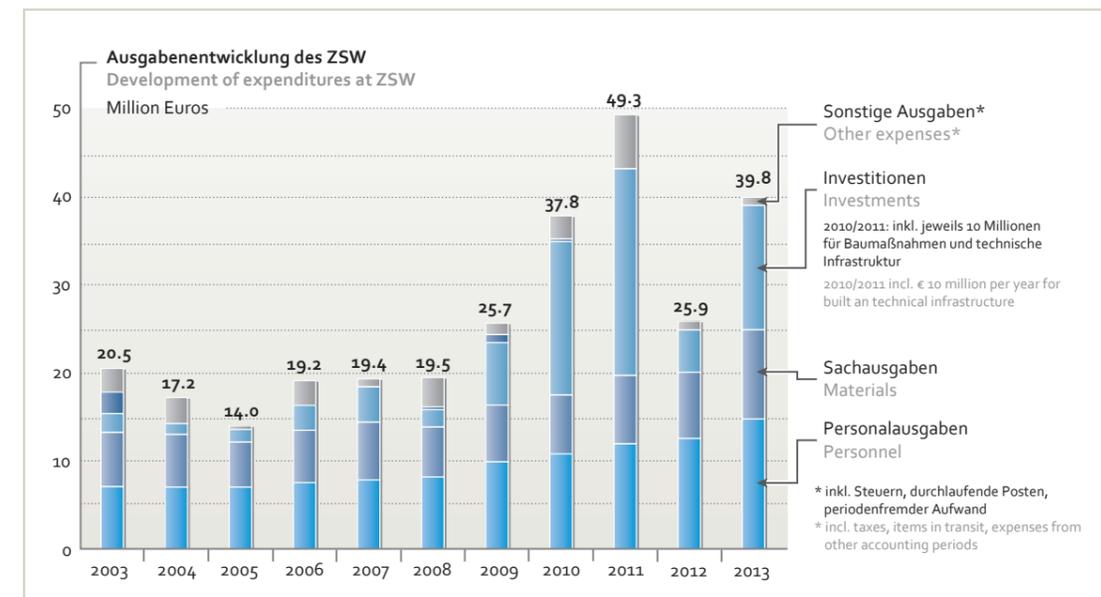
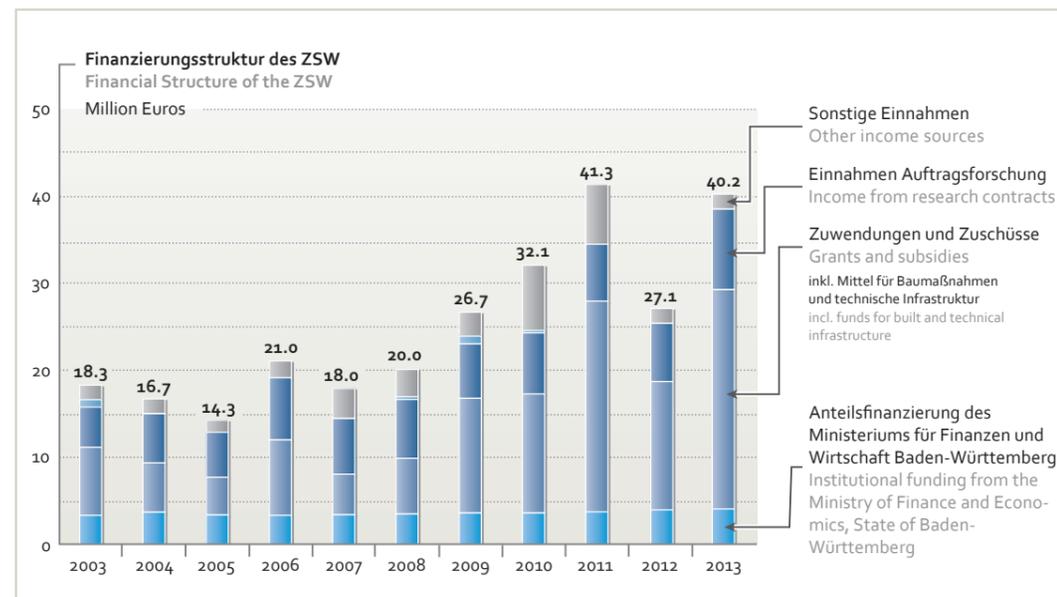
// Revenue – expenditure

In the past year, the income volume from normal business activities was €40.2 million and thus considerably higher than in the previous year. This is mainly due to the fact that more revenue was received from public grants for constructing the research production line for lithium-ion cells in Ulm.

ZSW has managed to establish itself internationally as one of the leading research institutions for battery technologies and generate increasing revenues from contract research and public research grants. The revenue from contract research reached a new record of €9.2 million and, with an increase of +19%, was therefore considerably more than the previous year's value. The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased in 2013 by €0.1 million to €4.1 million.

Das korrespondierende Ausgabenvolumen erhöhte sich gegenüber dem Vorjahr auf 39,8 Mio. Euro, im Wesentlichen durch die Erhöhung der Investitionsausgaben für den Aufbau der Forschungsproduktionslinie für Lithium-Ionen-Zellen. Die Personalausgaben stiegen durch das projektbedingte Wachstum der Belegschaft sowie durch Tarifierhöhungen.

The corresponding expenditure volume increased relative to the previous year to €39.8 million, which was mainly due to an increase in the investment expenditure on constructing the research production line for lithium-ion cells. Personnel expenditure rose in accordance with the project-related expansion of the workforce and as a result of collectively bargained pay increases.



// Personalentwicklung Staff Development



IHK Region Stuttgart

IHK-Ausbildungsbetrieb

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

// Personalentwicklung

Wie in der mittelfristigen Finanzplanung und im Wirtschaftsplan beabsichtigt, hat sich der Wachstumstrend beim Personal 2013 weiter fortgesetzt. Die Mitarbeiterkapazität erreichte zum 31. Dezember 212 Vollzeitstellen. Das entspricht 231 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Mit einem Anteil von 83% des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität unverändert hoch.

Das ZSW beschäftigt derzeit vier Auszubildende. In der mechanischen Werkstatt werden drei Industriemechaniker und in der Verwaltung eine Kauffrau für Bürokommunikation ausgebildet.

Im Berichtsjahr fertigten am Institut 25 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertationen an.

// Staff development

In accordance with our medium-term financial and economic plan, staff numbers continued to increase in 2013. By 31 December, the staff capacity reached 212 full-time equivalent positions. This corresponds to 231 employees. With 83% of all staff active in the scientific and technical area, a high level of productivity is still being achieved.

ZSW currently employs four trainees. Three apprentices are training to become industrial mechanics at the mechanical workshop. Administration, an office communication assistant is undergoing training.

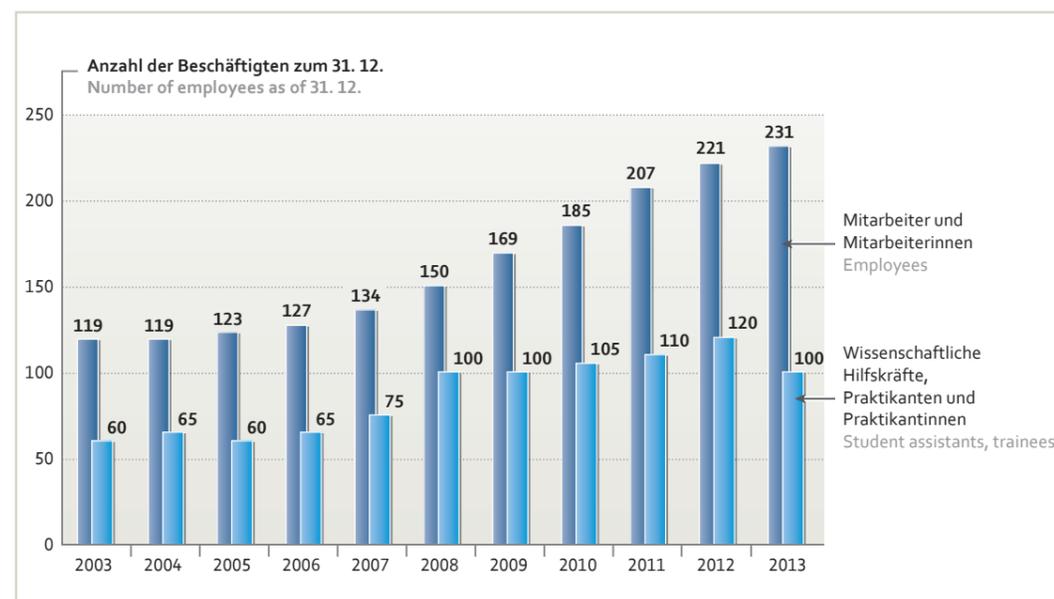
In the year under review, 25 PhD students worked on their theses at the institute.

Neben den nach dem Tarifvertrag der Länder beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sind am ZSW 100 Studierende und Praktikanten tätig. Von besonderer Bedeutung sind die Vernetzung mit Hochschuleinrichtungen und die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten.

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

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.

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



// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications



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

- / Alink R. (FhG-ISE), Haußmann J., Markötter H. (HZB), Schwager M. (FhG-ISE), Manke I. (HZB), Gerteisen D. (FhG-ISE); **The influence of porous transport layer modifications on the water management in polymer electrolyte membrane fuel cells**; Journal of Power Sources 233 (2013) 358-368
- / Bickel P.; **Chapter 5 "Social costs of on-shore wind energy in Europe"**; in: T. Jennssen (Ed.), Glances at Renewable and Sustainable Energy, Principles, approaches and methodologies for an ambiguous benchmark, 2013
- / Brellachs J., Steiert S., Specht M., Poboß N. (Univ. Stuttgart), Buchholz D. (DVGW-EBI); **Regenerative Kraftstoffe aus Biomasse durch AER-Biomassevergasung**; „Effizient, umweltverträglich, dezentral – Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen Festbrennstoffen“, Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms Energetische Biomassenutzung, Band 12, 2013
- / Dsoke S., Tian X., Täubert C., Schlüter S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Strategies to reduce the resistance sources on Electrochemical Double Layer Capacitor electrodes**; Journal of Power Sources 238 (2013) 422-429
- / Eicke A., Ciba T., Hariskos D., Menner R., Tschamber C., Witte W.; **Depth profiling with SNMS and SIMS of Zn(O,S) buffer layers for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; Surface Interface Analysis 2013, 45, 1811-1820
- / Enz S., Klages M., Bergbreiter C., Messerschmidt M., Markötter H. (HZB), Kardjilov N. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Investigation on dynamic water transport of PEFCs combining neutron radiography and CFD simulation**; ECS Transactions 51 (1) (2013) 215-226
- / Frick V.; **Erzeugung von Erdgassubstitut unter Einsatz kohlenoxidhaltiger Eduktgase – Experimentelle Untersuchung und simulationsgestützte Einbindung in Gesamtprozessketten**; Dissertation, Universität Stuttgart, Berlin, 2013
- / Friedlmeier T., Mantilla Pérez P., Klugius I., Jackson P., Kiowski O., Ahlswede E., Powalla M.; **Optoelectronic characterization of co-evaporated and low-cost Cu(In,Ga)Se₂ solar cells, a comparison**; Thin Solid Films 535 (2013) 92-96
- / Günther C., Schott B., Hennings W. (FZJ), Waldowski P. (TU Berlin), Danzer M.; **Model-based investigation of electric vehicle battery aging by means of vehicle-to-grid scenario simulations**; Journal of Power Sources 239 (2013) 604-610
- / Haußmann J., Markötter H. (HZB), Alink R. (FhG-ISE), Bauder A. (DLR), Dittmann K. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Synchrotron radiography and tomography of water transport in perforated gas diffusion media**; Journal of Power Sources 239 (2013) 611-622
- / Käbitz S. (RWTH), Gerschler J. (RWTH), Ecker M. (RWTH), Yurdagel Y. (RWTH), Emmermacher B., André D. (ACCUmotive), Mitsch T. (ACCUmotive), Sauer D. (RWTH); **Cycle and calendar life study of a graphite/LiNi_{1/3}Mn_{2/3}Co_{1/3}O₂Li-ion high energy system, Part A: Full cell characterization**; Journal of Power Sources 239 (2013) 572-583
- / Kaymaksiz S., Wilhelm F., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Hartnig C. (Rockwood), Tschernych I. (Rockwood), Wietelmann U. (Rockwood); **Electrochemical stability of lithium salicylate-borates as electrolyte additives in Li-ion batteries**; Journal of Power Sources 239 (2013) 659-669
- / Klages M., Enz S., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Kardjilov N. (HZB), Scholta J.; **Investigations on dynamic water transport characteristics in flow field channels using neutron imaging techniques**; Journal of Power Sources 239 (2013) 596-603
- / Klugius I., Miller R. (Millipore), Quintilla A., Friedlmeier T., Blázquez-Sánchez D., Ahlswede E., Powalla M.; **Rapid thermal processing for printed Cu(In,Ga)(S,Se)₂ solar cells: Comparison of precursor materials**; Thin Solid Films 535 (2013) 107-111
- / Lämmle A., Würz R., Powalla M.; **Efficiency enhancement of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells by a post deposition treatment with potassium fluoride**; Phys. Status Solidi RRL 7, No. 9, 631-634 (2013)
- / Li J., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; **A comparative study of state charge estimation algorithms for LiFePO₄ batteries used in electric vehicles**; Journal of Power Sources 230 (2013) 244-250
- / Linssen J. (FZJ), Danzer M., Marker S. (TU Berlin), Maas H. (Ford), Strunz K. (TU Berlin), Weinmann O. (TU Berlin); **Netzintegration von Elektrofahrzeugen und deren Auswirkungen auf die Energieversorgung**; Energie-wirtschaftliche Tagesfragen 1-2/2013
- / Mack F. (HIU), Gogel V., Jörissen L., Kerres J. (Univ. Stuttgart); **Novel anode based on sulfonated polysulfone for medium temperature direct methanol fuel cells**; Journal of Power Sources 239 (2013) 651-658
- / Marinaro M., Eswara Moorthy S.K. (Univ. Ulm), Bernhard J. (Univ. Ulm), Jörissen L., Wohlfahrt-Mehrens M., Kaiser U. (Univ. Ulm); **Electrochemical and electron microscopic characterization of Super-P based cathodes for Li-O₂ batteries**; Beilstein Journal of Nanotechnology 4 (2013) 865-670
- / Marinaro M., Riek U., Eswara Moorthy S.K. (Univ. Ulm), Bernhard J. (Univ. Ulm), Kaiser U. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M., Jörissen L.; **Au-coated carbon cathodes for improved oxygen reduction and evolution kinetics in aprotic Li-O₂ batteries**; Electrochemistry Communications 37 (2013) 53-56
- / Marinaro M., Theil S., Jörissen L., Wohlfahrt-Mehrens M.; **New insights about the stability of lithiumbis(trifluoromethane)sulfonimide-tetraglyme as electrolyte for LiO₂ batteries**; Electrochimica Acta 108 (2013) 795-800
- / Markötter H. (HZB), Haußmann J., Alink R. (FhG-ISE), Tötze C. (HZB), Arlt T. (HZB), Klages M., Riesemeier H. (BAM), Scholta J., Gerteisen D. (ISE), Banhart J. (HZB), Manke I. (HZB); **Influence of cracks in the microporous layer on the water distribution in a PEM fuel cell investigated by synchrotron radiography**; Electrochemistry Communications 34 (2013) 22-24
- / Musiol F., Jachmann H.; **Das Windhöffigkeitsklassenmodell als alternative Standortdifferenzierung der Windstromvergütung im EEG**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 12/2013
- / Musiol F., Nieder T., Rüter T., Bickel P.; **Zum Stand der Energiewende: Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 2012**; Energie-wirtschaftliche Tagesfragen 10/2013
- / Ott T. (HS Ulm), Walter T. (HS Ulm), Hariskos D., Kiowski O., Schäffler R. (Manz); **Accelerated aging and contact degradation of CIGS solar cells**; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 3, No. 1, January 2013
- / Petzl M. (HIU), Danzer M.; **Advancements in OCV measurement and analysis for lithium-ion batteries**; IEEE Transactions on Energy Conversion PP 1-7 (2013)
- / Powalla M.; **High-efficiency Cu(In,Ga)Se₂ cells and modules**; Solar Energy Materials and Solar Cells 119 (2013) 51-58
- / Romanyuk Y.E. (EMPA), Fella C.M. (EMPA), Uhl A.R. (EMPA), Werner M. (EMPA), Tiwari A.N. (EMPA), Schnabel T., Ahlswede E.; **Recent trends in direct solution coating of kesterite absorber layers in solar cells**; Solar Energy Materials & Solar Cells 119 (2013) 181-189
- / Schmidt J.P. (KIT), Tran H.Y., Richter J. (KIT), Ivers-Tiffée E. (KIT), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Analysis and prediction of the open circuit potential of lithium-ion cells**; Journal of Power Sources 239 (2013) 696-704
- / Schnabel T., Löw M., Ahlswede E.; **Vacuum-free preparation of 7.5% efficient Cu₂ZnSn(S,Se)₄ solar cells based on metal salt precursors**; Solar Energy Materials & Solar Cells 117 (2013) 324-328
- / Seidenberger K., Wilhelm F., Haußmann J., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Grand canonical Monte Carlo study on water agglomerations within a polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layer**; Journal of Power Sources 239 (2013) 628-641
- / Specht M., Frick V., Stürmer B., Waldstein G. (Etogas), Zuberbühler U.; **Power to Gas (P2G®): Technik und Perspektiven in Kopplung mit Biogasanlagen**; VDI Berichte Nr. 2208 (2013) S. 209 (Tagungsband zur 7. Fachtagung Biogas 2013 – Energieträger der Zukunft, Nürtingen, 12.-13.6.2013)
- / Theil S., Fleischhammer M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Experimental investigations on the electrochemical and thermal behaviour of LiCoPO₄-based cathode**; Journal of Power Sources 222 (2013) 72-78
- / Vogel-Sperl A., Püttner A., Diekmann J. (DIW), Groba F. (DIW); **Erneuerbare Energien im Bundesländervergleich**; in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 4/2013
- / Weideler M. (Univ. Ulm), Wessendorf C.D., Hanisch J., Ahlswede E., Götz G. (Univ. Ulm), Schulz G. (Univ. Ulm), Mena-Osteritz E. (Univ. Ulm), Mishra A. (Univ. Ulm), Bäuerle P. (Univ. Ulm); **Dithienopyrrole-based oligothiophenes for solution-processed organic solar cells**; Chem. Commun, 2013, 49, 10865-10867
- / Witte W., Abou-Ras D. (HZB), Hariskos D.; **Chemical bath deposition of Zn(O,S) and CdS buffers: influence of Cu(In,Ga)Se₂ grain orientation**; Applied Physics Letters 102, 051607 (2013)
- / Witte W., Hariskos D., Eicke A., Menner R., Kiowski O., Powalla M.; **Impact of annealing on Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with Zn(O,S)/(Zn,Mg)O buffers**; Thin Solid Films 535 (2013) 180-183
- / Zuberbühler U., Specht M., Brinner A., Baumgart F., Stürmer B., Feigl B., Frick V.; **Power-to-Gas, 250-kW_{el}-Testanlage für Speichertechnologie und Mobilität**; EUROSOLAR – Zeitschrift Solarzeitalter, 2013

// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications



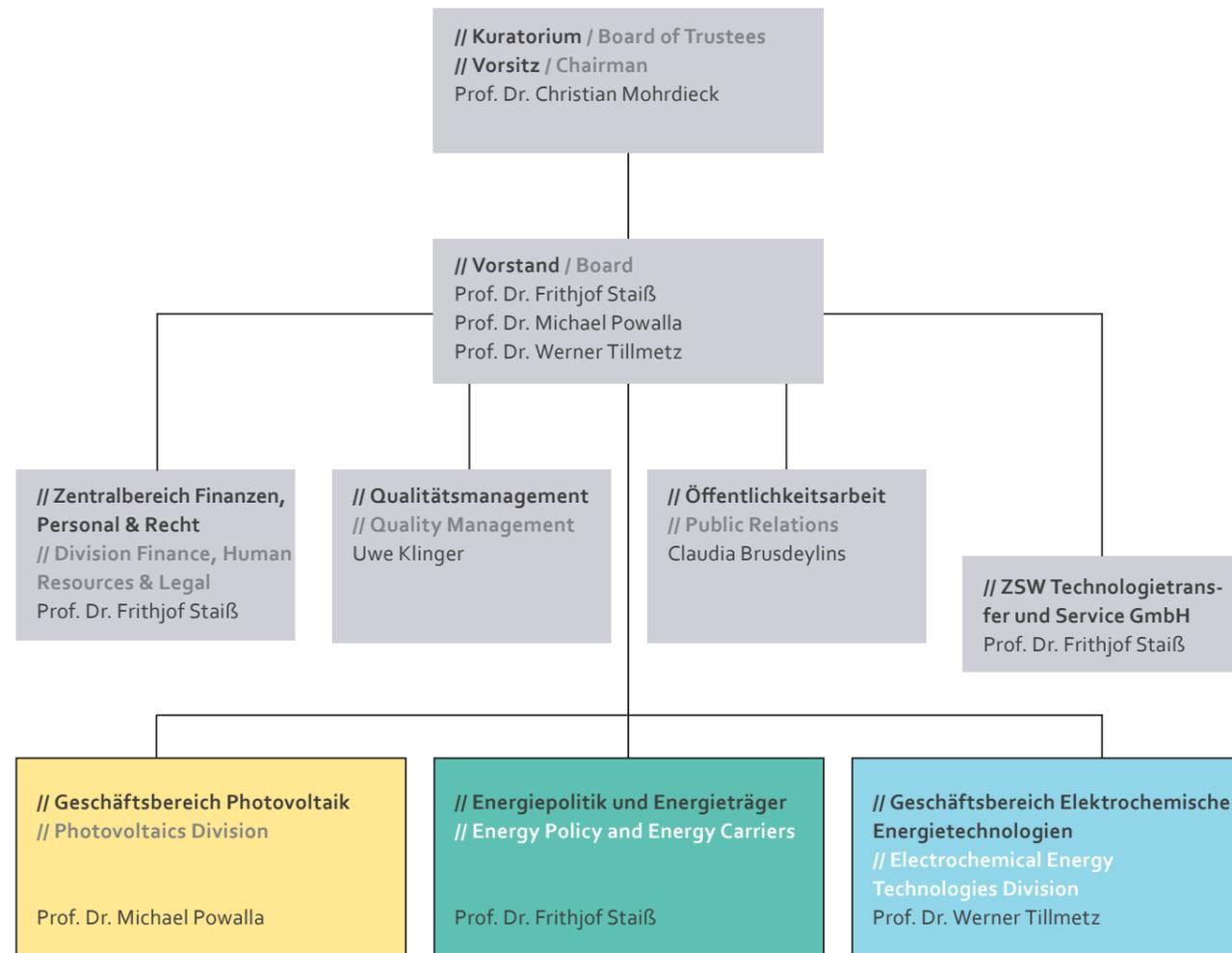
// Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

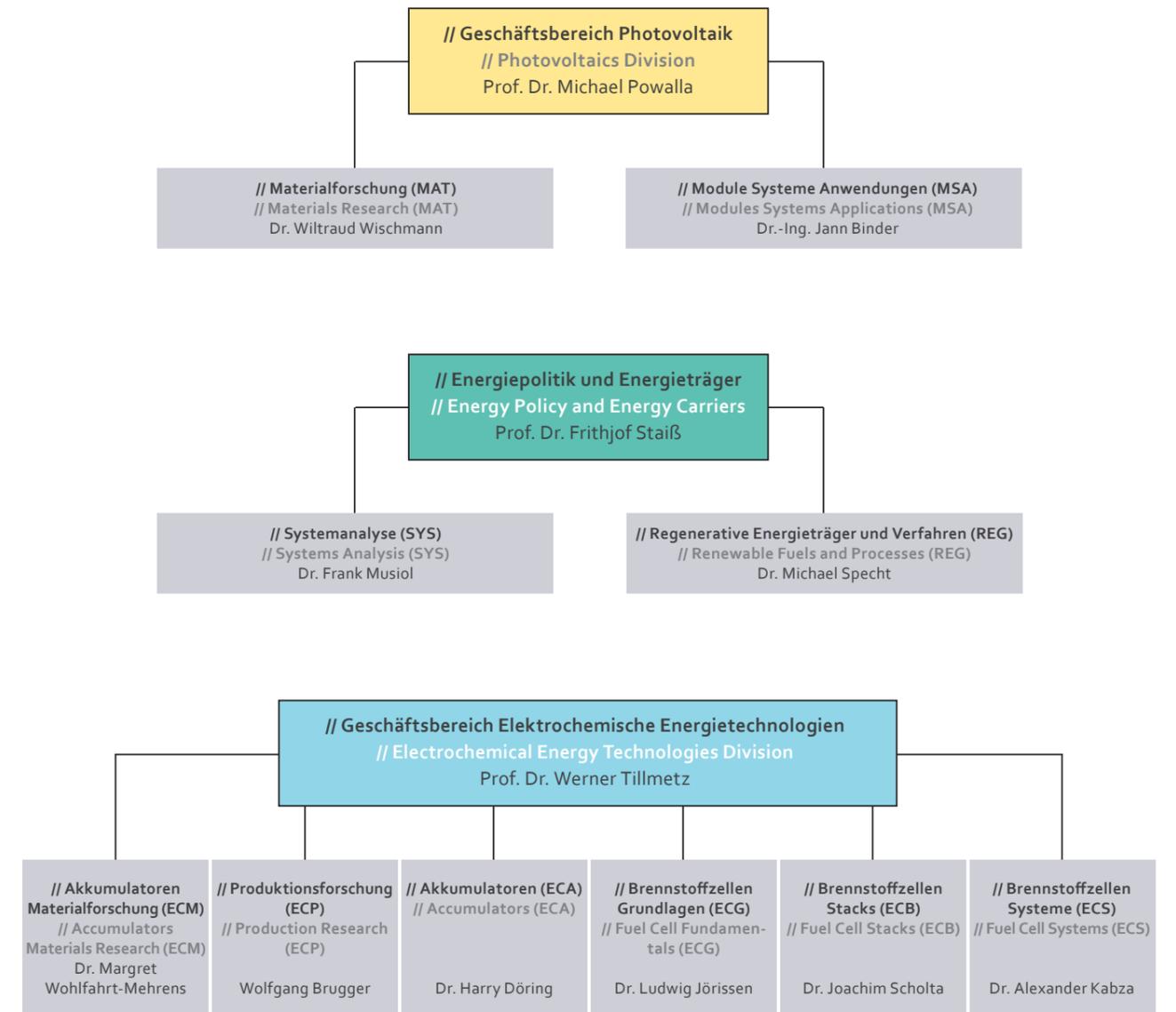
- / Abzieher T., Schnabel T., Ahlswede E., Hetterich M. (KIT); **Influence of sodium on solution processed Cu₂ZnSn(Se,S)₄ solar cells**; 4th European Kesterite Workshop, Berlin, 21-22 Nov. 2013
- / Ahlswede E., Hanisch J., Schmid C., Wahl T.; **Polymer-Solarzellen**; 23. Stuttgarter Kunststoff-Kolloquium, Universität Stuttgart, Institut für Kunststofftechnik, Stuttgart, 6.3.2013
- / Alink R. (FhG-ISE), Haußmann J., Markötter H. (HZB), Manke I. (HZB), Gerteisen D. (FhG-ISE); **The influence of porous transport layer modifications on the water management in PEM fuel cells**; Hydrogen and Fuel Cell Conference (HFC), Vancouver, 16-19 June 2013
- / Axmann P., Wilka M., Hoffmann A., Marinaro M., Theil S., Jörissen L., Wohlfahrt-Mehrens M.; **New materials combinations for LiB – influence of electrode preparation**; 6th International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells, Ulm, 3-7 June 2013
- / Bauder A. (DLR), Haußmann J., Markötter H. (HZB), Alink R. (FhG-ISE), Manke I. (HZB), Scholta J., Friedrich K.A. (DLR); **Self-supporting microporous layers (MPLs) for PEM fuel cells**; 224th ECS Meeting, San Francisco, 27 Oct. – 1 Nov. 2013
- / Bauer A., Menner R., Botros M., Witte W., Eicke A.; **Sputtered Zn(O,S) from mixed targets as buffer layer in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells**; 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 30 Sept.–4 Oct. 2013
- / Binder J.; **PV-Systeme als Energiequelle für Strom und Wärme: Potenziale für Eigenverbrauch und Auslegung von elektrischen und thermischen Speichern in Gebäuden**; CEB Clean Energy Building, Kongress „Stromspeicherung in Gebäuden“, Stuttgart, 7.2.2013
- / Binder J., Williams C., Schott B., Günther C., Danzer M.; **Dezentrale PV-Systeme: Amortisation von Batteriespeichern in Abhängigkeit von Systemauslegung, Alterung und Tarifen**; 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 6.–8.3.2013
- / Cojocar-Miréin O. (MPIE), Schwarz T. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Herbig M. (MPIE), Würz R., Raabe D. (MPIE); **Characterization of CIGS grain boundaries using correlative EBSD-TEM-APT**; MRS Spring Meeting, San Francisco, 1–5 April 2013
- / Danzer M., Binder J.; **Die Rolle der Solarenergie für die Energiewende – PV-Speichersysteme als dezentraler Beitrag**; Solar Energy Solution im Rahmen der World of Energy Solutions, Stuttgart, 30.9.2013
- / Danzer M., Petzl M. (HIU), Günther C., Tillmetz W.; **Characterization of lithium-ion battery ageing – in situ, non-invasive testing, diagnosis and modeling**; Munich Battery Discussions, Garching, 15 March 2013
- / Fleischhammer M., Bisle G., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Initial reactions during thermal runaway of lithium-ion batteries**; Kraftwerk Batterie, Aachen, 26.–27.2.2013
- / Fleischmann S., Bekaert E. (HIU/KIT), Emmel U. (Rockwood), Wietelmann U. (Rockwood), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Trilithium hexahydroaluminate (Li₃AlH₆) as negative electrode material for lithium-ion batteries**; 2nd International Conference on Materials for Energy – EnMat II, Karlsruhe, 12–16 May 2013
- / Geyer D.; **Recent trends in PV systems**; EU Jordan Networking Event in Energy within JERA-Center, National Center for Research and Development NCRD, Amman, 27–28 Feb. 2013
- / Geyer D., Hummel S., Lechner P., Mohring H.-D.; **Development of test procedures for flexible PV modules**; 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 30 Sept.–4 Oct. 2013
- / Hariskos D., Malinen V. (Beneq Oy), Bürkert L. (Manz), Jackson P., Paetel S., Scarp J. (Beneq Oy), Dimmler B. (Manz); **Atomic layer deposition of Zn(O,S) buffer layer for CIGS-based solar cells**; 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 30 Sept.–4 Oct. 2013
- / Hess S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Arkhipova M. (Univ. Ulm), Maas G. (Univ. Ulm); **Investigation of new guanidinium-based ionic liquids as possible electrolytes in lithium-ion batteries**; 224th ECS Meeting, San Francisco, 27 Oct.–1 Nov. 2013
- / Hess S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M., Arkhipova M. (Univ. Ulm), Maas G. (Univ. Ulm); **Untersuchung von neuen Guanidinium-Salzen auf ihre Anwendbarkeit als Elektrolyte für Lithium-Ionen-Batterien**; GDCh Wissenschaftsforum CHEMIE 2013, Darmstadt, 1.–4.9.2013
- / Klages M., Wilhelm F., Seidenberger K., Scholta J.; **Morphology and wettability of different gas diffusion layers and their impact on fuel cell operation**; 5. European Fuel Cell Technology and Applications Conference – Piero Lunghi Conference, Rome, 11–13 Dec. 2013
- / Klee Barillas J., Li J., Günther C., Küber P., Danzer M.; **Modelling and emulation of lithium-ion battery modules for battery management systems**; Design & Elektronik-Entwicklerforum Batterien und Ladekonzepte, München, 13.–14.3.2013
- / Kugler B. (HS Aalen), Weisenberger C. (HS Aalen), Gorse S. (HS Aalen), Knoblauch V. (HS Aalen), Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Aging mechanisms in lithium-ion-batteries: A comparative study on 18650-cells with LiMn₂O₄/Li(Mn_xNi_yCo₂)O₂ blend cathodes**; Kraftwerk Batterie, Aachen, 26.–27.2.2013
- / Lechner P.; **Neue Entwicklungen bei Dünnschichtsolarellen**; 11. Österreichische Photovoltaik-Tagung, St. Pölten, 19.–20.11.2013
- / Lechner P.; **PID failure of c-Si and thin-film modules and possible correlation with leakage currents**; NREL 2013 Photovoltaic Module Reliability Workshop, Golden, 26–27 Feb. 2013
- / Lechner P., Hummel S., Geyer D., Mohring H.-D.; **PID behaviour of thin-film and c-Si PV-modules**; 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 30 Sept.–4 Oct. 2013
- / Li J., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; **Dual estimation for lithium-ion batteries using adaptive parameter identification and sequential Monte Carlo filter**; Kraftwerk Batterie, Aachen, 26.–27.2.2013
- / Marinaro M., Eswara Moorthy S.K. (Univ. Ulm), Riek U., Kaiser U. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M., Jörissen L.; **The rate capability of Li-O₂ batteries with ether-based electrolyte**; 224th ECS Meeting, San Francisco, 27 Oct. – 1 Nov. 2013
- / Markötter H. (TU Berlin, HZB), Haußmann J., Klages M., Seidenberger K., Wilhelm F., Arlt T. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J., Bahnhart J. (TU Berlin, HZB); **Synchrotron X-ray imaging for characterization of fuel cell materials**; 5th Joint BER II and BESSY II User Meeting 2013, Berlin, 4–6 Dec. 2013
- / Matthiss B., Williams C., Binder J., Danzer M., Schott B.; **Analysis and comparison of battery control algorithms for increased grid compatibility of decentralized PV systems**; 8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2013), Berlin, 18-20 Nov. 2013
- / Powalla M.; **High-efficiency Cu(In,Ga)Se₂ cells and modules**; PVTC 2013 – Photovoltaic Technical Conference Thin Film & Advanced Silicon Solutions, Aix-en-Provence, 22–24 May 2013
- / Powalla M., Witte W., Jackson P., Paetel S., Lotter E., Würz R., Kessler F., Tschamber C., Hempel W., Hariskos D., Menner R., Bauer A., Spiering S., Ahlswede E., Friedlmeier T., Blázquez-Sánchez D., Klugius I., Wischmann W.; **CIGS cells and modules with high efficiency on glass and flexible substrates**; 39th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Tampa, 16–21 June 2013
- / Schott B., Williams C., Binder J., Danzer M., Felder M., Heilscher G. (STZ), Ruf H. (STZ); **Optimizing low-voltage distribution networks with high feed-in of renewable energies**; 8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2013), Berlin, 18-20 Nov. 2013
- / Sehnke F.; **Efficient baseline-free sampling in parameter exploring policy gradients: Super symmetric PGPE**; 23rd International Conference on Artificial Neural Network – ICANN 2013, Sofia, 10-13 Sept. 2013
- / Sehnke F., Binder J., Felder M., Kaifel A.; **Wertigkeit der Photovoltaik im Strommix als Ergebnis der Systemkosten-Optimierung mit P²IONEER**; 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 6.–8.3.2013
- / Sehnke F., Strunk A. (EWC), Felder M., Brombach J. (EWC), Kaifel A., Meis J. (EWC); **Wind power resource estimation with deep neural networks**; 23rd International Conference on Artificial Neural Network – ICANN 2013, Sofia, 10–13 Sept. 2013
- / Stellbogen D., Lechner P., Mohring H.-D.; **Long term performance characterisation of PV generators**; 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, 30 Sept.–4 Oct. 2013
- / Strunk A. (EWC), Brombach J. (EWC), Meis J. (EWC), Sehnke F., Felder M., Kaifel A.; **Wind resource estimation using a MCP method based on deep neural networks**; EWEA 2013, Wien, 4–7 Feb. 2013
- / Stump S., Günther C., Danzer M., Kostetzer L. (CADFEM), Rudnyi E. (CADFEM); **Design of a spatially resolved electro-thermal model for lithium-ion pouch cells**; ANSYS Conference & 31th CADFEM Users' Meeting 2013, Mannheim, 19–21 June 2013
- / Tost A., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Raman study on NMC-cathodes to understand the reasons for aging in full cell systems – Part A: In-situ studies during regular charge and overcharge**; LiBD 2013 – 6th Lithium Battery Discussions, Arcachon, 16–21 June 2013
- / Vierrath S. (IMTEK), Haußmann J., Markötter H. (HZB, TU Berlin), Manke I. (HZB), Scholta J., Zengerle R. (IMTEK), Thiele S. (IMTEK); **Improving segmentation of PEMFC X-ray tomographies**; IMTEK Research Day 2013, Freiburg, 9 Dec. 2013
- / Wilka M., Hoffmann A., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Interactions of anode and cathode in 18650 lithium ion cells investigated with a reference electrode**; Batteries 2013, Nice, 14–16 Oct. 2013
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **Next generation of rechargeable batteries**; Asia Smart Grid/Electromobility (ASGE) Conference, Singapore, 29–30 Oct. 2013
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **Towards long life and safer lithium ion batteries; Batteries for the Future 2013**; Como, 20 May 2013
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **Neue Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien**; GDCh Wissenschaftsforum CHEMIE 2013, Darmstadt, 1.–4.9.2013
- / Zuberbühler U., Specht M., Brinner A., Baumgart F., Stürmer B., Frick V.; **Power-to-Gas (P2G) – Experience with demo and pilot plants up to 99% methane**; 8th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2013), Berlin, 18-20 Nov. 2013

// Organigramme Organisational Charts

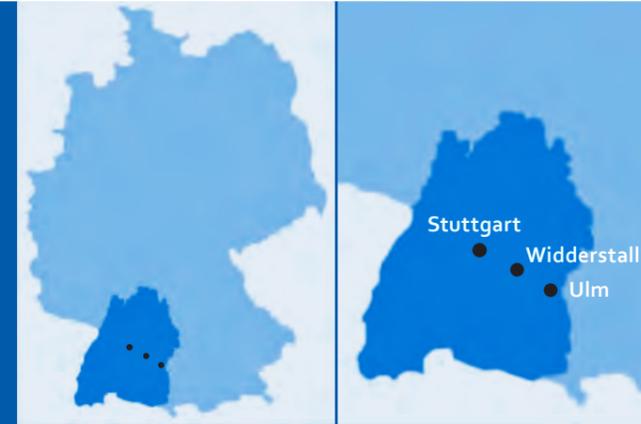
// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart



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



// Standorte Locations



// Stuttgart



Industriestraße 6
70565 Stuttgart

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

// Widderstall



Widderstall 14
89188 Merklingen

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

// Ulm



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

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

// Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

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

// Abkürzungen Abbreviations

// Firmen, Institute, Institutionen

// Companies, Institutes, Institutions

| | |
|------------------|--|
| AGEE-Stat | Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| DIN | Deutsches Institut für Normung/German institute for standardisation |
| DIW | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DVGW | Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. |
| DVGW-EBI | DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut |
| ECS | Electrochemical Society |
| EMPA | Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt |
| EWC | European Weather Consult |
| FhG-ISE | Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme |
| FZJ | Forschungszentrum Jülich |
| GDCh | Gesellschaft Deutscher Chemiker |
| HIU | Helmholtz-Institut Ulm |
| HS | Hochschule |
| HZB | Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie |
| IEA | International Energy Agency |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| IMTEK | Institut für Mikrosystemtechnik |
| ISE | Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme |
| KEA | Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| KLiB | Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien |
| KSOP | Karlsruhe School of Optics and Photonics |
| MFW | Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg |
| MPIE | Max-Planck-Institut für Eisenforschung |
| MRS | Materials Research Society |
| NREL | National Renewable Energy Laboratory |
| RWTH | Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule |
| STZ | Steinbeis-Transferzentrum |
| TU | Technische Universität |
| VDA | Verband der Automobilindustrie |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| ZSW | Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg |

// Technische Begriffe

// Technical Terms

| | |
|------------|---|
| AC | Alternating Current / Wechselstrom |
| AEL | Alkaline Electrolysis/ alkalische Elektrolyse |
| AER | Absorption-Enhanced Reforming |
| APT | Atom Probe Tomography |
| BMS | Battery Management System |
| BOP | Balance of Plant |
| BtG | Biomass to Gas |
| BtL | Biomass to Liquid |

| | |
|-------------------|--|
| BZ | Brennstoffzelle |
| CAD | Computer-Aided Design |
| CBD | Chemical Bath Deposition |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| C-Fuels | Carbon-Based Fuels/kohlenstoffbasierte Kraftstoffe |
| CHP | Combined Heat and Power/Kraft-Wärme-Kopplung |
| CIGS | Copper, Indium, Gallium, Selenium / Kupfer, Indium, Gallium, Selen |
| CNG | Compressed Natural Gas |
| CZTS | Copper Zinc Tin Sulfide/Kupfer-Zink-Zinnsulfid |
| DC | Direct Current / Gleichstrom |
| DMFC | Direct-Methanol Fuel Cell / Direkt-Methanol-Brennstoffzelle |
| EBS | Electron Back-Scatter Diffraction |
| EE | Renewable Energy / erneuerbare Energien |
| EEG | Renewable Energy Sources Act / Erneuerbare-Energien-Gesetz |
| EQE | External Quantum Efficiency / externe Quanteneffizienz |
| EWC-NN MCP | European Weather Consult Neural Networks Measure Correlate Predict |
| FC | Fuel Cell/Brennstoffzelle |
| FF | Fill Factor / Füllfaktor |
| FPL | Research Production Line/Forschungsproduktionslinie |
| FTIR | Fourier Transform Infrared |
| GDL | Gas Diffusion Layer/Gasdiffusionslage |
| GtL | Gas to Liquid |
| LiB | Lithium Battery/Lithium-Batterie |
| LPG | Liquefied Petroleum/Propane Gas/Flüssiggas |
| μ-CT | Micro-Computed Tomography / Mikro-Computertomographie |
| MCP | Measure Correlate Predict |
| MEA | Membrane Electrode Assembly / Membran-Elektroden-Anordnung |
| MPL | Microporous Layer / mikroporöse Schicht |
| MT | Medium-Temperature / Mitteltemperatur |
| NEDC | New European Driving Cycle |
| NMC | Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide |
| OCV | Open-Circuit Voltage |
| P2G | Power to Gas |
| PEFC | Polymer Electrolyte Fuel Cell / Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle |
| PEM | Polymer Electrolyte Membrane / Polymerelektrolytmembran |
| PEM | Proton Exchange Membrane / Protonen-Austausch-Membran |
| PEMFC | Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell / Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle |
| PGPE | Policy Gradients with Parameter-based Exploration |
| PHEV | Plugin Hybrid Electric Vehicle |
| PID | Potential-Induced Degradation / potenzialinduzierte Degradation |
| PV | Photovoltaics / Photovoltaik |
| R2R | Roll to Roll / Rolle zu Rolle |
| REMO | Renewable Electricity Market Optimisation Module |
| SET | Self-Extinguishing Time |
| SFS | Teilfluorierte Sulfonierte Polyether / partially fluorinated sulfonated Polyether |
| SIMS | Secondary Ion Mass Spectrometry / Sekundärionen-Massenspektrometrie |
| SNG | Substitute Natural Gas / Erdgassubstitut |
| SNMS | Secondary Neutral Mass Spectrometry / Sekundär-Neutralteilchen-Massenspektrometrie |
| SOEL | Solid Oxide Electrolysis / Hochtemperatur-Festelektrolyt-Elektrolyse |
| sPSU | Sulfonated Polysulfone / sulfoniertes Polysulfon |
| TEM | Transmission Electron Microscopy / Transmissionselektronenmikroskopie |

// Mitgliedschaften

// ZSW is a member of



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

// Impressum

// Imprint

// Herausgeber Publisher

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

Industriestraße 6

70565 Stuttgart

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

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

E-mail: info@zsw-bw.de

Internet: www.zsw-bw.de

// Redaktion Editors

Tiziana Bosa

Claudia Brusdeylins

Alexander Del Regno

Gudrun Scherg

Ulrike Zimmer

// Koordination Coordination

Karl-Heinz Frietsch

// Layout & Satz Layout & Setting

Sieber & Wolf Werbeagentur

Hofgut Mauer 1

70825 Korntal-Münchingen

www.sieberundwolf.de



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

Stuttgart:

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

Solar-Testfeld Widderstall:

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

Ulm:

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

Ulm eLaB:

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



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