# // ERGEBNISSE RESULTS





Stuttgart: Industriestraße 6 70565 Stuttgart

Fon: +49(0)7117870-0 Fax: +49(0)7117870-100 www.zsw-bw.de

Solar-Testfeld Widderstall: Ulm: Widderstall 14

Fon: +49(0)7337 92 394-0

www.zsw-bw.de

89188 Merklingen

Helmholtzstraße 8 89081 Ulm

Fon: +49(0)7319530-0 Fax: +49(0)733792394-20 Fax: +49(0)7319530-666 Fax: +49(0)7319530-599

www.zsw-bw.de

Ulm eLaB:

Lise-Meitner-Straße 24 89081 Ulm

Fon: +49(0)7319530-500

www.zsw-bw.de



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

# // Inhalt **Contents**

_	Varivort	/ Foreword
2	VOIWOIL	/ rolewold

- Leitbild / The Mission 4
- Stiftung / Foundation
- Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees

#### Erfolge 2014 / Achievements 2014

#### Schwerpunktbericht / Focus Report

Schlüsseltechnologien für die Energiewende "Made in Germany" Key technologies for the energy turnaround "Made in Germany"

#### Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects

- Systemanalyse / Systems Analysis
- Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
- Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
- Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
- Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
- Produktionsforschung / Production Research 52
- Akkumulatoren / Accumulators 54
- Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals 58
- Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
- Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems

#### 66 Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations

- Dokumentation / Documentation
- Finanzielle Entwicklung / Financial Development 76
- Personalentwicklung / Staff Development 78
- Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
- Organigramme / Organisational Charts 84
- Standorte / Locations
- Abkürzungen / Abbreviations
- Impressum / Imprint

# // Vorwort Foreword

Der Europäische Rat hat im Oktober 2014 die Eckpunkte der Klimaschutzstrategie für das Jahr 2030 verabschiedet, die eine Senkung der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um mindestens 40% vorsieht. Auf nationaler Ebene hat die Bundesregierung ihren ersten Fortschrittsbericht zur Energiewende vorgelegt. Trotz eines positiven Trends bei den erneuerbaren Energien räumt der Bericht für 2020 eine drohende erhebliche Verfehlung des Klimaschutzziels und der Energieeffizienzziele ein. Dem soll mit den ambitionierten Maßnahmen im Aktionsprogramm Klimaschutz und dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz begegnet werden.

Das ZSW unterstützt die Bundesregierung und die Landesregierung Baden-Württemberg beim Monitoring der Energiewende, im Vordergrund stehen jedoch technologische Entwicklungen, die zum Erfolg der Energiewende beitragen sollen. Wir haben deshalb den Schwerpunkt unseres Jahresberichts 2014 auf Schlüsseltechnologien für die Energiewende gelegt. Zu den Highlights zählt neben einem Weltrekord für die Effizienz von Dünnschicht-Solarzellen der Aufbau einer Forschungsplattform für die industrielle Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen für Batterien in mobilen und stationären Anwendungen. Zusammen mit den vorhandenen Anlagen besteht damit am ZSW auf 10.000 m² Fläche eine weltweit einmalige Infrastruktur, mit der wir alle Entwicklungsstufen von der Erforschung neuer Aktivmaterialien bis hin zur Fertigung kompletter Zellen unter industrierelevanten Bedingungen abdecken können. Damit wollen wir den Aufbau einer kommerziellen Produktion von Batterien in Deutschland voranbringen.

Wir freuen uns über das anhaltend hohe Interesse an unseren Arbeiten, das wir in vielen Gesprächen und einer erfreulich intensiven Berichterstattung in den Medien erfahren. Dies ist das Verdienst aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, für deren großartigen Einsatz sich der Vorstand zuallererst bedanken möchte. Besonderer Dank gilt auch den Mitgliedern des Kuratoriums und dessen Vorsitzendem, Prof. 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.

Allen Leserinnen und Lesern des ZSW-Jahresberichts wünschen wir eine interessante Lektüre!

In October 2014, the European Council adopted the cornerstones of the climate protection strategy for 2030, which provides for a reduction in greenhouse gas emissions by at least 40% versus 1990 levels. On a national level, the German Federal Government has submitted its first progress report on the energy turnaround. Despite positive trends in renewable energy, the report acknowledges the threat of considerable underachievement in terms of the climate protection and energy efficiency targets for 2020. This is to be averted with the ambitious climate protection measures of the Climate Protection Action Programme and the National Action Plan for Energy Efficiency.

ZSW supports the Federal Government and the regional government of Baden-Württemberg in monitoring the energy turnaround, but the focus is on technological developments that will contribute to the success of the energy turnaround. This is why we placed the emphasis of our 2014 Annual Report on key technologies of the energy turnaround. The highlights include a world record in the efficiency of thin-film solar cells and the construction of a Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells for batteries in mobile and stationary applications. At the ZSW location and on 10,000 m² with already existing facilities, there is now a globally unique infrastructure with which we can cover all stages of researching new active materials through to producing complete cells under industry-relevant conditions. We aim to spur the establishment of commercial battery production in Germany.

We are pleased with the continuing great interest in our work, which we experience in many discussions and intensive media coverage. This is owed to all of our employees whom, first and foremost, the Board would like to thank for their outstanding commitment. 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, and our partners from companies, public research funding and science.

We hope you enjoy reading the ZSW Annual Report!



// Prof. Dr. Werner Tillmetz

// Prof. Dr. Frithjof Staiß

// Prof. Dr. Michael Powalla



# // Leitbild des ZSW The Mission of ZSW

#### // Energie mit Zukunft

Ohne Energie kein Wohlstand, ohne Energie keine Entwicklung. Energie ist Treiber für Innovation und selbst Gegenstand von Innovation. Ökonomisch, ökologisch und gesellschaftlich tragfähige Energiekonzepte sind untrennbar mit der Nutzung erneuerbarer Energien und der Steigerung der Energieeffizienz verbunden. Dafür arbeitet das ZSW: Wir erforschen und entwickeln Photovoltaik, regenerative Energieträger (wie Wasserstoff und Methan als Erdgasersatz), Batterie- und Brennstoffzellentechnologien und erstellen ökonomische Analysen von Energiesystemen.

#### // Wissenschaft mit klarem Fokus

In unseren Arbeitsgebieten zählen wir zu den international führenden Forschungseinrichtungen. Nur wer sich im Forschungswettbewerb behauptet, ist in der Lage, Schlüsseltechnologien erfolgreich zu entwickeln und mit der Wirtschaft umzusetzen. Dafür spielt die Vernetzung von Wissensdisziplinen aus Natur-, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften am ZSW eine große Rolle.

#### // Technologietransfer schafft Arbeitsplätze

Als industrieorientiertes Forschungsinstitut ebnen wir neuen Technologien den Weg in den Markt. Von der Materialforschung über die Entwicklung von Prototypen und Produktionsverfahren bis hin zu Anwendungssystemen, Qualitätstests und Marktanalysen decken wir die gesamte Wertschöpfungskette ab. Diese Expertise aus einer Hand ist für unsere Partner aus der Wirtschaft ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

#### // Qualität für unsere Kunden

Die Zufriedenheit unserer Kunden hat oberste Priorität. Als unabhängiges Institut reagieren wir schnell und flexibel. Die Qualität unserer Leistungen, Budget- und Termintreue sowie der Umgang mit Vertraulichkeit stimmen. Dazu trägt auch unser zertifiziertes Qualitätsmanagement bei.

#### // Motiviert im Team

Die Leistungsfähigkeit des ZSW basiert auf einer hohen fachlichen Qualifikation und Motivation aller Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die gelebte Wertschätzung des Einzelnen, der kollegiale Umgang miteinander und transparente Entscheidungsprozesse sind ein zentrales Element unseres Selbstverständnisses.

#### // Dem Ganzen verpflichtet

Vorstand, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ZSW fühlen sich dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung verpflichtet. Kriterien unserer Technologieentwicklung sind deshalb die Schonung natürlicher Ressourcen, gesellschaftlicher Konsens und wirtschaftliche Tragfähigkeit.

#### // Akteure neutral informieren

Unsere Themen 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.

#### // Energy is our future

Energy is crucial for prosperity and development. It drives innovation and is itself the subject of innovation. Our research and development covers photovoltaics, renewable energy sources (such as hydrogen and methane gas as a natural gas substitute), battery and fuel cell technologies; our analyses cover the economics of energy systems.

#### // Science is our power

We are among the leading research institutions in our respective fields, which puts us in a position to develop a range of related technologies and successfully implement them within the market place. Linking the disciplines of science, engineering and economics is the core of ZSW's discipline.

#### // Innovation is our strength

As an industry-oriented research institute, we pave the way for new technologies to enter the market. We cover the entire value chain, from materials research, prototype development and production processes to application systems, quality tests and market analyses. This range of expertise from a single source is the key to success for our partners in the business world.

#### // Quality is our watchword

Customer satisfaction is our top priority. As an independent institute, we are able to respond to our customers' requirements quickly and flexibly. We take pride in the quality of our services, our adherence to budget stipulations and deadlines and our commitment to confidential information. Our high standards owe much to our certified quality management.

#### // Teamwork is our bond

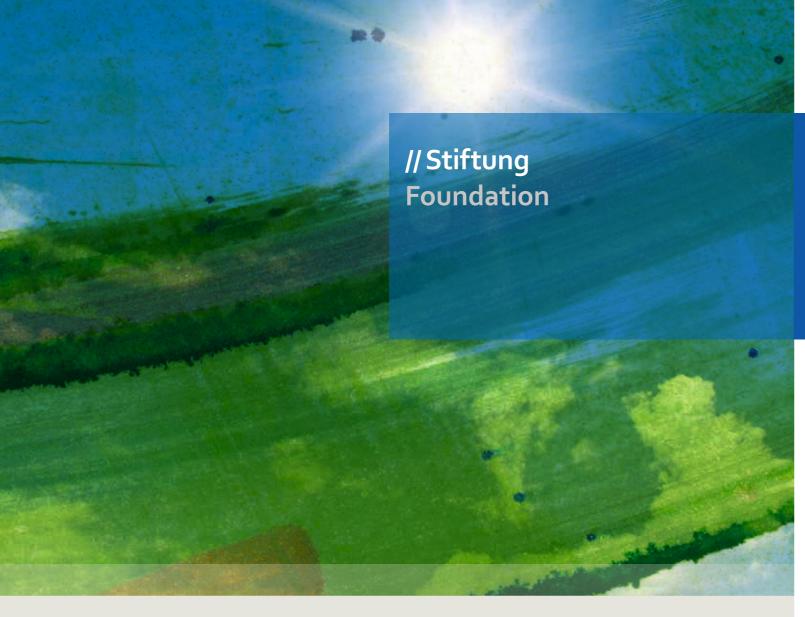
Our strength is founded on the motivation of our highly qualified, and professional employees. Active recognition of each individual, collegial interaction and transparent decision-making processes are central to all our activities.

#### // The environment is our concern

The management and employees of ZSW are committed to sustainable development. The protection of natural resources, social consensus and economic viability are the criteria on which our technology is based. A sustainable energy supply is the ultimate aim of our work.

#### // Knowledge is our force

Thanks to our knowledge of all the complex elements that must be combined to provide a sustainable future, we are able to deliver transparent, neutral information to the economic, political and social arenas. This provides the tools to those industries and institutions responsible for our future to make decisions based on the best unbiased information.



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

#### Stiftungsauftrag:

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

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

#### The goal of the foundation is:

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

#### Stifter des ZSW / The founders are

#### Institutionen und Forschungseinrichtungen /

Institutions and research establishments

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

#### Unternehmen / Commercial enterprises

- > Aare-Tessin AG für Elektrizität
- > Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Daimler AG
- > 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
- > 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, Applied Solar Expertise
- > Dr. Jürgen Kirschner, Robert Bosch GmbH
- > Prof. Dr.-Ing. Jürgen Leohold, Volkswagen AG
- > Dieter Manz, Manz AG
- > Prof. Dr. Christian Mohrdieck, Daimler AG
- > Prof. 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



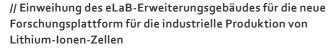
# // Erfolge 2014 Achievements 2014

"Energie mit Zukunft" umschreibt das Ziel, den Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen und damit zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu kommen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW durch die Entwicklung neuer und verbesserter Energietechnologien und ihren Transfer in den Markt.

So wurden auch 2014 wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

"Energy with a future" describes the goal of increasing the share of renewable energy sources to ensure a sustainable energy supply. ZSW is pursuing this goal by developing new and improved energy technologies and ensuring their transfer to the market.

In 2014, excellent results in the core topic areas were achieved once again.



Im Beisein von Bundesforschungsministerin Johanna Wanka wurde am 26. September in Ulm eine neue "Forschungsplattform zur industriellen Fertigung von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL)" eingeweiht. Für die Hightech-Produktionsanlagen im industriellen Maßstab wurde das ZSW Labor für Batterietechnologie (eLaB) um einen vierten Gebäudeteil erweitert. Das ZSW betreibt mit der neuen Plattform und den bereits existierenden Labor- und Testanlagen jetzt ein einmaliges, rund 10.000 m² großes Batterieforschungszentrum. Hier werden neue Aktivmaterialien hergestellt, Komponenten evaluiert und nun auch die seriennahe Produktion großer Lithium-Akkus entwickelt.

Die Forschungsplattform umfasst alles, was für die seriennahe Herstellung automobiltauglicher Zellen benötigt wird. Sie erlaubt eine Fertigung von bis zu einer Zelle pro Minute mit reproduzierbarer, hoher Qualität. Der modulare Aufbau der Produktionsanlagen bietet Unternehmen und Forschungsorganisationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette die Möglichkeit, neue Verfahren und Anlagenkomponenten in einer prozesssicheren Testumgebung zu erproben. Hersteller von Batteriematerialien können neue Rezepturen in Standardzellen demonstrieren, Maschinenbauer ihre Fertigungstechnologien im Anlagenverbund optimieren. Mit diesem weltweiten Leuchtturm entstand eine vorwettbewerbliche Forschungsplattform, mit der direkt die Blaupausen für die kommerzielle Fertigung generiert werden.

// Inauguration of the eLaB extension building for the new Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells

In the presence of Federal Minister of Research and Education Johanna Wanka, a new "Research Platform for the Industrial Production of large Lithium-ion Cells (FPL)" was inaugurated in Ulm on 26 September. A fourth block has been added to the ZSW laboratory for battery technology (eLaB) for the industrial scale high-tech production facilities. With the new platform and the existing laboratory and testing facilities, ZSW now operates a unique battery research centre with 10,000 square metres of floor space. This is where new active materials are created, components are evaluated and the near-series production of large lithium batteries is now being advanced.

The research platform includes everything that is required for near-series manufacture of automotive cells. It allows the production of up to one cell per minute with a reproducible, high level of quality. The modular structure of the production facilities enables companies and research organisations to test new processes and system components along the entire value chain in a reliable test environment. Producers of battery materials can test their latest compositions in standard cells, and machine manufacturers can optimise their production technologies in a joint system. This global beacon helped create a pre-competitive research platform with which the blueprints for commercial production are being created.



// Erweiterungsbau für die Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL), im Bild links.

// Extension building for the Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells (FPL), on the left.

# // Weltrekord bei CIGS-Dünnschicht-Solarzellen: Effizienzsprung auf 21,7 %!

Nach den Rekorden von 20,3 % im Jahr 2010 und 20,8 % im Jahr 2013 hat das ZSW im September 2014 mit einem Wert von 21,7 % erneut die weltweit effizienteste CIGS-Solarzelle hergestellt. Mit diesem Wert beträgt der Vorsprung gegenüber multikristallinem Silizium nunmehr 1,3 %. Der Erfolg bestätigt das enorme Potenzial der CIGS-Dünnschicht-Photovoltaik. Technische Grundlagen für den Erfolg waren ein optimierter Einbau von Alkalielementen sowie eine Anpassung der Pufferschichten und der Zusammensetzungsgradienten in der CIGS-Schicht. Durch diese Maßnahmen wird mehr Strom in der Zelle generiert.

# // Einer neuen Generation fahrzeugtauglicher Brennstoffzellen einen Schritt näher: "Autostack CORE"-95-kW-Brennstoffzellen-Stack im Teststand

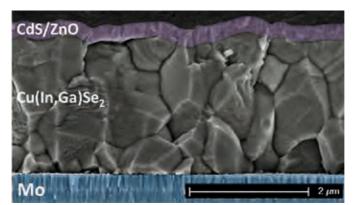
Dem europäischen Projektverbund Autostack-CORE gehören drei Fahrzeughersteller, drei Systemintegratoren und drei Komponentenhersteller sowie fünf Forschungsinstitute an – das Ulmer ZSW ist Projektkoordinator. Im Projekt sollen neue Brennstoffzellen entwickelt werden, die die Fahrzeuganforderungen bei Leistung, Lebensdauer und Sicherheit erfüllen sowie eine deutliche Kostenreduktion ermöglichen. Nach nur 20 Monaten ist es gelungen, einen 95-kW-Brennstoffzellen-Stack zu entwickeln. Mit 35-l-Volumen und 2,7 kW/l Leistungsdichte bei einem Gewicht von 47 kg ist der Stack ausgelegt für den mobilen Einsatz in Pkw. Bis zu ersten Fahrzeugeinsätzen ist noch mit zwei weiteren Designschleifen zu rechnen, für den Prüfstand eignet sich der Stack aber jetzt schon. Mit diesem Erfolg ist es gelungen, der Konkurrenz in Japan und Kanada einen entscheidenden Schritt näherzukommen.

# // World record for CIGS thin-film solar cells: efficiency leap to 21.7%!

After the records of 20.3% in 2010 and 20.8% in 2013, ZSW has once again produced the world's most efficient CIGS solar cell with an efficiency of 21.7% in September 2014. With this value, the advantage over multicrystalline silicon is now at 1.3%. This success confirms the enormous potential of CIGS thin-film photovoltaics. The technical foundations for this success were optimised integration of alkali elements and adaptation of the buffer layers and composition gradients in the CIGS layer. With these measures, more electricity can be generated in the cell.

## // A step closer to a new generation of automotive fuel cells: "Autostack CORE" 95-kW fuel cell stack on the test bench

The European project group Autostack-CORE comprises three vehicle manufacturers, three system integrators and three component manufacturers as well as five research institutes – the project coordinator is ZSW Ulm. The aim of the project is to develop new fuel cells that fulfil vehicle requirements in terms of performance, service life and safety as well as enabling a significant reduction in costs. After just 20 months, the project has now succeeded in developing a 95-kW fuel cell stack. With a weight of 47 kg, a volume of 35 l, and a power densitiy of 2.7 kW/l, it is designed for mobile application in cars. First uses in vehicles can be expected after a further two design loops; however, the stack is already fit for the test bench now. This success represents a decisive step in closing the gap to competitors in Japan and Canada.



// Aufnahme der Bruchkante einer CIGS-Solarzelle im Rasterelektronenmikroskop. // Breaking edge of a CIGS solar cell as seen through a scanning electron microscope.



// Fahrzeugtauglicher 95-kW-Brennstoffzellen-Stack im Teststand. // Vehicle-suitable 95-kW fuel cell stack in the test rig.

# // Erfolge 2014 Achievements 2014

#### // Bau und Inbetriebnahme eines Elektrolyse-Teststands

Das ZSW hat 2014 am Standort Stuttgart seine Test-Infrastruktur für Forschungsprojekte und Dienstleistungen auf dem Gebiet der Elektrolyse erweitert. Inzwischen steht ein Prüfstand für den Test von alkalischen Elektrolysezellen, Kurzblöcken mit variabler Zellanzahl und -fläche sowie Systemkomponenten im 100-kW-Leistungsbereich zur Verfügung. Die Größe der Zellen kann bis zu 1,6 m Durchmesser betragen. Der Stand ermöglicht unterschiedlichste Messungen der wichtigsten Kernkomponenten der Druckelektrolyse in Originalgröße bei maximal 25 bar Druck und 5.000 Ampere Gleichstrom. Getestet werden künftig sowohl eigene, am ZSW entwickelte Stacks und Komponenten als auch Produkte externer Elektrolysehersteller. Das ZSW knüpft mit dem neuen Teststand an mehrere abgeschlossene sowie derzeit laufende Elektrolyseprojekte an.

#### // Sahara-Bedingungen in Süddeutschland

Mit dem 3X-Spiegelkonzentrator auf dem Testfeld Widderstall wurde eine neue Prüfmethode entwickelt: Hier werden Photovoltaikmodule bei gleichzeitig durchgeführtem In-situ-Leistungsmonitoring einer Belastung ausgesetzt, die den Bedingungen im Sonnengürtel der Erde ähnelt. Der Konzentrator mit beidseitigen Spiegeln wird motorisch der Sonne nachgeführt. Dabei erreicht die Bestrahlungsstärke auf den Testmodulen bis zu 3.000 W/m². Die im Jahresverlauf empfangene Einstrahlung ist etwa zweieinhalbmal höher als auf einem optimal nach Süden ausgerichteten, fest stehenden Modul und kommt mit mehr als 2.000 kWh/m² derjenigen in Südeuropa oder Nordafrika gleich. Kundenaufträge zeigen, dass Testmodule am mitteleuropäischen Freifeld-Standort auf diese Weise in kürzerer Zeit bezüglich ihrer Stabilität geprüft und eventuelle Schwachstellen an der Konstruktion oder dem Halbleiter des Moduls frühzeitig erkannt werden können.

// Construction and commissioning of electrolysis test rig

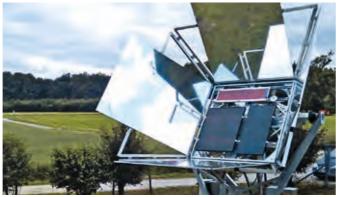
In 2014, ZSW expanded their testing infrastructure in Stuttgart for research projects and services in the field of electrolysis. There is now a test rig for alkaline electrolysis cells, short blocks with variable cell numbers and surface area as well as system components in the 100-kW power range. Cell diameters can reach up to 1.6 metres. The rig allows for a wide variety of measurements of the most important core components of pressure electrolysis in their original sizes at 25 bar and 5000 amperes direct current. ZSW's own developed stacks and components as well as third party electrolysis products will be tested in the future. The new test rig ties in with several completed and ongoing electrolysis projects.

#### // Sahara-like conditions in southern Germany

ZSW has developed a new testing method with the 3X concentrating mirror on the Widderstall testing facility: photovoltaic modules are exposed to a load similar to the conditions encountered in sunbelt countries while simultaneously monitoring their in situ performance. The double-sided concentrating mirror tracks the sun with a motor. Irradiance achieved on the test modules reaches up to 3,000 W/m². The irradiance received in the course of a year is about two and a half times higher than that of a fixed module optimally oriented to the south and approaches that of a module located in Southern Europe or North Africa with over 2,000 kWh/m². Client orders demonstrate that test modules on the Central European outdoor site can be tested in less time with respect to their stability, and possible weaknesses in design or in the module semiconductors can be detected at an early stage.



// Der neue Elektrolyse-Teststand ist in Betrieb. // New electrolysis test rig in operation.



// 3X-Spiegelkonzentrator zur Simulation von Sahara-Betriebsbedingungen. // 3X concentrating mirror to simulate Sahara-like operating conditions.



// Frontalansicht des Stuttgarter Institutsneubaus in der Visualisierung.
// Rendered frontal view of the new Stuttgart institute building.
Source: Henning Larsen Architects

#### // Leitstern Energieeffizienz Baden-Württemberg

Der Beirat der Landesregierung für nachhaltige Entwicklung hat den Wettbewerb "Leitstern Energieeffizienz" auf Kreisebene initiiert, um die Steigerung der Energieeffizienz im Sinne von "Best Practice" zu fördern. Mit der Konzeptentwicklung und Durchführung wurde das ZSW vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft beauftragt. Die Komplexität des Vorhabens legt einen modularen Aufbau des Wettbewerbs nahe. Aufgrund der Bedeutung des Bereichs für das Erreichen der Klimaschutzziele lag der Fokus 2014 auf dem Wärmebereich. Im Jahr 2015 kommt der Stromsektor hinzu und ab 2016 der Verkehrssektor. Grundlage ist ein Indikatorensystem, das sowohl Anstrengungen und Aktivitäten der Land- und Stadtkreise berücksichtigt als auch messbare Erfolge. Neben der Auszeichnung der insgesamt führenden Kreise wurden im Sinne eines "Voneinanderlernens" zusätzlich Sonderpreise für innovative Aktivitäten verliehen (weitere Informationen: www.leitstern-energieeffizienz-bw.de).

#### // Institutsneubau Stuttgart hat begonnen

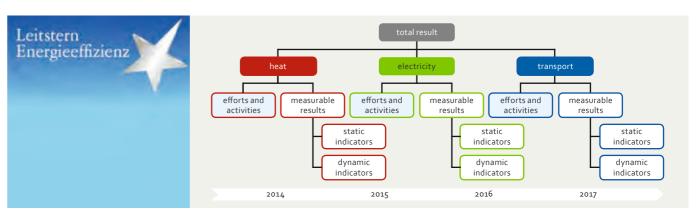
Der Neubau des ZSW-Stammhauses hat am 21. Oktober 2014 mit dem "Baggerbiss" begonnen. Der Rohbau startet Anfang Februar 2015 und für das 4. Quartal 2016 ist der Umzug in das neue Domizil vorgesehen. Das neue Forschungs- und Verwaltungsgebäude entsteht auf dem Areal des Stuttgarter Engineering-Parks (STEP) an der Meitnerstraße in Stuttgart-Vaihingen. Unterstützt wird der Bau vom Land Baden-Württemberg und der Landeshauptstadt Stuttgart. Vom neuen Standort erwartet das ZSW größere Flexibilität in der Ausgestaltung der Laborund Büroflächen und noch bessere Bedingungen für die Energieforschung.

#### // Leitstern Energieeffizienz in Baden-Württemberg

The State Government's advisory board for sustainable development has initiated the competition "Leitstern Energieeffizienz" (Guiding Star of Energy Efficiency) on a district level to promote the improvement of energy efficiency in the sense of "best practice". The Ministry of the Environment, Climate Protection and the Energy Sector commissioned ZSW with concept development and implementation. The complexity of the project suggests a modular competition structure. Due to the importance of the field for the achievement of climate protection targets, the focus in 2014 was on the issue of heat. The electricity sector will be added in 2015, and the transport sector in 2016. The competition is based on an indicator system that considers the efforts, activities and measurable successes of both rural and urban districts. In addition to awarding the leading districts, there were special awards for innovative activities in the sense of "mutual learning" as well (further information: www.leitstern-energieeffizienz-bw.de).

#### // New institute building in Stuttgart has started

The groundbreaking ceremony for the ZSW head office was held on 21 October 2014. Work on the building shell will start in early February 2015, with an intended relocation in Q4 2016. The new research and administration building is being built on the site of the Stuttgart Engineering Park (STEP) near Meitnerstrasse in Stuttgart-Vaihingen. Construction costs are being subsidised by the State of Baden-Württemberg and the state capital of Stuttgart. ZSW expects greater flexibility in the design of laboratory and office space and better conditions for energy research from the new location.



// Überblick über die Konzeption des "Leitsterns Energieeffizienz". // Overview of the conception of the "Leitstern Energieeffizienz".





// Industrielle Produktion von neuen Energietechnologien

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende und der Weg in die Elektromobilität bergen erhebliche Chancen für die deutsche Volkswirtschaft, denn die Energiewende ist nicht nur ein Innovationstreiber par excellence, sondern die ausgelöste Innovationstätigkeit ist auch mit dem Technologie- und Wettbewerbsprofil Deutschlands kompatibel und kann damit auf einem breiten Fundament aufsetzen. Die starke internationale Wettbewerbsposition spiegelt u. a. der Global Competitiveness Report des World Economic Forum wider. Danach liegt Deutschland auf Rang 5 bei der Wettbewerbsfähigkeit und auf Platz 6 im Innovationsranking. Gleichzeitig entfällt mehr als die Hälfte der Exporte Deutschlands auf energiewenderelevante Wirtschaftszweige wie "Kraftwagen und Kraftwagenteile", "Maschinen" oder "elektrische Ausrüstung".

#### // Industrial production of new energy technologies

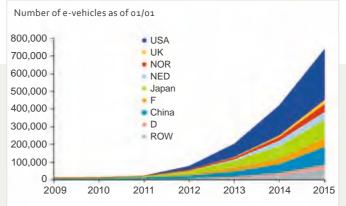
The successful implementation of the energy turnaround and the path to e-mobility will create significant opportunities for the German economy. This is because the energy turnaround is not only a driver of innovation par excellence, but, in addition, the innovative activity triggered is also compatible with the technology and competitive profile of Germany and can therefore build on a broad base. The strong international competitive position is reflected among other things by the Global Competitiveness Report of the World Economic Forum. According to this, Germany is in 5<sup>th</sup> place in terms of competitiveness and 6<sup>th</sup> place in the innovation ranking. At the same time, more than half of Germany's exports stem from sectors of the economy of relevance for the energy turnaround, such as "vehicles and vehicle components", "machines" or "electrical equipment".

Um diese Stärken für die Zukunft zu erhalten, kann sich Deutschland nicht allein mit Forschungserfolgen für zukünftige Schlüsseltechnologien zufriedengeben. Vielmehr ist die industrielle Fertigung von Anlagen und Produkten unabdingbar, um entscheidende Teile der Wertschöpfungskette im Land zu halten und zukunftsfähige Arbeitsplätze zu schaffen.

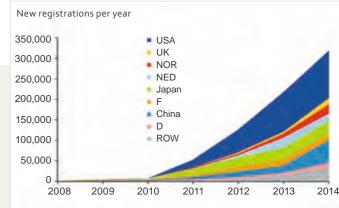
In vielen Bereichen der Energiewende verläuft die Entwicklung positiv. Neben der Strom- und Wärmewende brauchen wir aber auch eine Mobilitätswende. Dabei geht es im Sinne der Bundesregierung nicht zuletzt darum, Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter für die Elektromobilität zu etablieren. Trotz zahlreicher Demonstrationsprojekte liegen wir bei der Marktdurchdringung im internationalen Vergleich allerdings deutlich zurück. Nach einer Untersuchung des ZSW wurden 2014 weltweit 320.000 Elektrofahrzeuge verkauft (s. Grafik). Daraus resultieren alleine etwa 2 Mrd. Euro Umsatz für die Lithium-Ionen-Zellen. In Deutschland wurden hingegen nur 11.000 Fahrzeuge zugelassen. Um das gesetzte Ziel zu erreichen, müssen wir jetzt mindestens "einen Gang hochschalten". Denn wie die Erfahrung in anderen Ländern zeigt, ist der sogenannte "Market Pull" ein wichtiger Faktor zur Generierung einer Nachfrage nach neuen Produkten und damit für die Etablierung als internationaler Leitanbieter. Das ZSW will hierfür mit der Forschungsplattform für die Produktion großer Lithium-Ionen-Zellen einen Beitrag leisten, indem wir gemeinsam mit der Industrie neue Batterietechnologien in die kommerzielle Anwendung überführen.

Germany cannot be content merely with research success concerning future key technologies if it is to retain these strengths in the future. Rather, industrial production of systems and products is indispensable in terms of retaining decisive parts of the value-added chain in Germany and creating future-oriented jobs.

Developments in many areas of the energy turnaround are positive. However, in addition to the turnaround in electricity and heat, we also need a turnaround in mobility. From the perspective of the German Federal Government, this is not least about establishing Germany as a leading market and leading provider for electromobility. However, despite numerous demonstration projects, we are lagging significantly behind in terms of market penetration by international comparison. According to a study by ZSW, 320,000 electric vehicles were sold worldwide in 2014 (see the chart below). Around 2 billion euros of these sales result from the lithium-ion cells. By contrast, only 11,000 vehicles were registered in Germany. To achieve the goal set, we must now "shift up at least one gear". Because, as experience in other countries shows, the so-called market-pull is an important factor in terms of generating demand for new products and thus in establishing a country as the leading international provider. ZSW wants to make a contribution in this respect through the Research Platform for the Production of large Lithium-ion Cells, by transferring new battery technologies to commercial applications together with industry.



// Entwicklung Elektrofahrzeuge weltweit.
// Development of electric vehicles worldwide





#### // Batterien – Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert

Die dezentrale oder mobile Speicherung von elektrischer Energie mit Batterien stellt eine der Schlüsseltechnologien für die Energieversorgung im 21. Jahrhundert dar. Lithium-Ionen-Zellen sind Kernelement moderner Hybrid- und Elektroantriebe, da sie großen Einfluss auf Kosten, Reichweite und Zuverlässigkeit des Fahrzeugs haben. Damit wird die Lithium-Ionen-Technologie zu einem strategischen Element für die Automobilindustrie von morgen.

Für die dezentrale Speicherung von Strom, der beispielsweise mit der eigenen Photovoltaikanlage erzeugt wurde, bieten die Lithium-Ionen-Batterien mit ihrer hervorragenden Zyklenstabilität die Chance, den Eigenverbrauch von Solarstrom zu maximieren. Gleichzeitig können Verteilnetze optimiert und Notstromeigenschaften realisiert werden.

Der Fortschrittsbericht 2014 der Nationalen Plattform Elektromobilität fordert eine integrierte Zell- und Batterieproduktion in Deutschland. Materialien und Elektrochemie, Komponenten, Zellen, Batterien und Batteriemanagementsysteme bilden zusammen die Wertschöpfungskette Batterie. Der Schwerpunkt liegt auf der integrierten Zell- und Batterieproduktion, die etwa 30 bis 40 % der gesamten Wertschöpfung ausmacht. Außerdem ist die Beherrschung des gesamten Systems von Bedeutung, wobei die Herausforderungen im Packaging, in der Sicherheit und der Kostenreduzierung für die Zellen und das System selbst liegen.

#### // Batteries - key technology for the 21st century

The decentral or mobile storage of electrical energy using batteries is one of the key technologies for energy supply in the 21st century. Lithium-ion cells are a core element of modern hybrid and electrical drives, as they are the driving force in terms of costs, range and reliability of the vehicle. This makes lithium-ion technology to a strategic element for the automobile industry of tomorrow.

In terms of decentral storage of electricity, generated for example with a local photovoltaic system, lithium-ion batteries offer an opportunity of maximising self-consumption of solar power with their outstanding cycle stability. At the same time, electrical grids can be optimised and they provide emergency power.

The 2014 Progress Report of the National Electromobility Platform calls for an integrated cell and battery production in Germany. Together, materials and electrochemistry, components, cells, batteries and battery management systems form the battery value-added chain. The emphasis is on integrated cell and battery production which accounts for up to 30 to 40% of the overall added value. In addition, mastering of the entire system is important, whereby the challenges in terms of packaging, safety and cost reduction are the same for both cells and the system.

Entscheidend für marktfähige Lithium-Ionen-Zellen sind deren Lebensdauer und Leistung. Seit vielen Jahren wird in Deutschland an innovativen Aktivmaterialien geforscht. Neue Materialien alleine bewirken jedoch noch keine guten Batterien; es kommt auch auf die Wechselwirkung zwischen Elektrode und Elektrolyt an. Des Weiteren sind die richtige Partikelmorphologie sowie die ausgewählten Additive ausschlaggebend für die Herstellung von geeigneten Elektroden. Zelldesign, Qualität und Geschwindigkeit der Herstellprozesse bestimmen die Kosten und Qualität des Produktes. Und erst der ausgetüftelte Lebensdauer- und Sicherheitstest zeigt, ob eine Zelle die vielfältigen Anforderungen in der Praxis erfüllen kann.

Im Laborbereich wird zwar seit vielen Jahren intensiv an Lithium-Ionen-Technologien geforscht, aber über den Einfluss des Produktionsprozesses auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten gibt es noch zu wenig Wissen. Ebenso bedarf es neuer Produktionstechnologien für die Etablierung einer industriellen, seriennahen Produktion. Decisive factors for marketable lithium-ion cells are their lifetime and performance. Research into innovative active materials has been ongoing in Germany for many years; nevertheless, new materials alone do not create good batteries. The interaction between electrode and electrolyte is also important. Furthermore, the correct particle morphology as well as the selected additives are decisive in terms of producing suitable electrodes. Cell design, quality and speed of the production processes determine the costs and quality of the product. And it is only the sophisticated durability and safety test that confirms whether a cell can fulfil the diverse requirements in practice.

For many years, intensive research on lithium-ion technologies has been underway in laboratory scale; nevertheless, there is still insufficient knowledge concerning the influence of the production process on quality, safety and manufacturing costs. New production technologies are also needed for the establishment of industrial, close-to-series production.



// Die Qualität, Lebensdauer und Leistung der Elektrodenbänder sind entscheidend für die Lithium-Ionen-Zellen.

// The quality, lifetime and power of the electrodes are decisive for lithium-ion cells.



Das ZSW Labor für Batterietechnologie "eLaB" verfügt seit 2011 über die komplette Infrastruktur zur Fertigung kleiner Lithium-Ionen-Zellen bis fünf Amperestunden. Darüber hinaus wurde das europaweit bekannte Sicherheits- und Batterietestzentrum maßgeblich vergrößert. Erweitert wurde das eLaB 2014 um eine Forschungsplattform für die industrielle Fertigung von prismatischen Lithium-Ionen-Zellen (FPL) im Leistungsbereich ab 20 Amperestunden, die auch in Elektrofahrzeugen eingesetzt werden.

Mit der Ergänzung um die industriellen Produktionsanlagen sind jetzt alle Themenfelder der Batterieforschung auf 10.000 m² unter einem Dach untergebracht: die Materialforschung, die Elektroden- und Zelltechnologie, die Batteriesystemtechnik und das Batterietestzentrum. Damit gibt es am ZSW ein einmaliges Batterieforschungszentrum von der Entwicklung neuer Aktivmaterialien bis hin zur Fertigung kompletter Zellen unter industrierelevanten Bedingungen.

Since 2011, the ZSW laboratory for battery technology "eLaB" has had a complete infrastructure for the production of small lithium-ion cells of up to five ampere hours. The safety and battery testing centre renowned throughout Europe has also been significantly enlarged. In 2014, eLaB was extended by a Research Platform for the Industrial Production of prismatic Lithium-ion Cells (FPL) in the power range upwards of 20 ampere hours, which are also used in electric vehicles.

Following the addition of the industrial production facilities, all subject areas of battery research are now unified under one roof over an area of 10,000 m²: materials research, electrode and cell technology, battery system technology and the battery testing centre. As a result, ZSW has a unique battery research centre covering the development of new active materials through to the production of complete cells under industry-relevant conditions.



// PHEV-1-Zelle nach DIN-Standard für die Elektromobilität (ZSW-CAD-Skizze). // PHEV-1 cell according to DIN Standard for e-mobility (ZSW CAD sketch).

## // Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen im eLaB

Ziel für eine Produktion im industrierelevanten Umfeld ist es, die Qualität von Zellen zu erhöhen, Ausschussraten zu minimieren und gleichzeitig die Herstellkosten zu reduzieren. Dafür bedarf es neuer Materialien und Komponenten, die vor der Produktion in Musterserien unter realen Produktionsbedingungen hergestellt werden. Prozess- und Verfahrensparameter sind zu optimieren sowie neue Produktionsverfahren und Anlagenkomponenten in prozesssicherer Testumgebung zu entwickeln.

Die Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithiumlonen-Zellen (FPL) im eLaB beinhaltet alle Anlagen und die Infrastruktur, wie sie auch in einer kommerziellen Produktion zum Einsatz kommen. Damit können innovative Lithium-Ionen-Zellen reproduzierbar und mit hoher Qualität in Musterserien hergestellt
werden. Die Anlagen – von der Pastenherstellung über die Beschichtung bis hin zur Assemblierung und Formierung – sind bewusst nicht miteinander verkettet. Dadurch können neue Herstellprozesse flexibel in die Pilotfertigung integriert und erprobt
werden. Die für Qualität und Ausbeute entscheidenden Prozessparameter und Qualitätssicherungsmethoden können in seriennahem Umfeld weiterentwickelt werden.

## // Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells in the eLaB

The aim of production in an industry-relevant environment is to increase the quality of cells, minimise rejection rates and, at the same time, reduce manufacturing costs. This requires new materials and components that are manufactured prior to production in sample lines under real production conditions. Process and procedural parameters must be optimised as well as new production processes and system components developed in a process-secure test environment.

The Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells (FPL) in the eLaB includes all systems and the infrastructure also used in commercial production. As a result, innovative lithiumion cells can be manufactured in a reproducible manner and in high quality in sample lines. The systems – from slurry preparation through to coating, assembly and formation – are deliberately not permanently linked, so new and advanced manufacturing processes can be flexibly integrated and tested in pilot runs. The decisive process parameters and quality assurance methods in terms of quality and yield can be further developed under real world manufacturing conditions.



Zur Herstellung der Elektrodenpasten steht eine temperierbare 60-Liter-Mischanlage zur Verfügung. Das Abwiegen und Zuführen der Materialien erfolgt automatisch. Die beidseitige Beschichtung der Elektrodenbänder erlaubt eine doppelstöckige Elektrodenbeschichtungsanlage mit 500 mm Beschichtungsbreite, 30 m/min Bandgeschwindigkeit und verschiedenen Auftragssystemen. Da die Beschichtungsdicke entscheidend für die Qualität der Zelle ist, werden die Elektroden im nächsten Schritt mit einem Präzisionskalander mit 600 mm Walzenbreite verdichtet. Die voll automatisierte Zellassemblierung im 200 m² großen Trockenraum mit einem Taupunkt von -60 °C ermöglicht die Erprobung neuer Assemblierungstechnologien. Die daran anschließende Befüll- und Aktivierungsanlage ist ausgelegt auf eine Taktzeit von einer Zelle pro Minute. Zur ebenfalls vollautomatischen Zellformierung steht auf 70 m² Fläche ein sauerstoffreduzierter Raum mit 240 temperierbaren Zyklisierplätzen sowie 2.016 Lagerplätzen zur Verfügung.

Das interdisziplinäre, hochqualifizierte Team garantiert nicht nur den zuverlässigen Betrieb der Anlagen, sondern unterstützt unsere Industriepartner auch bei Kostenbetrachtungen und neuen Methoden der Qualitätssicherung. A temperature controlled mixing station is available for preparing slurries in 60 liter batches. The weighing and feeding of the materials is automatic. The double-sided electrode coating is enabled by a two-storey electrode coating line with 500 millimetre coating width, 30 m/min belt speed and various application systems. As the coating thickness is decisive for the quality of the cells, the electrodes are next compacted using a high precision calender with a roller width of 600 mm. The fully automated cell assembly in the 200 m² dry room with a dew point of -60 °C enables the testing of new assembly technologies. The subsequent filling and activation device is designed for a cycle time of one cell per minute. An oxygen-reduced room with 240 temperable cycle stations as well as 2,016 storage stations is available in a 70 m² area for fully automated cell formation.

The interdisciplinary, highly-qualified team not only guarantees the reliable operation of the systems but also supports our industrial partners in cost monitoring and puts new methods of quality assurance into practice.



// Kalander zum Verdichten der Elektrodenbänder. // Calender for compacting the electrode belts.

#### // Brennstoffzellen – die Markteinführung hat begonnen

Brennstoffzellensysteme werden zunehmend als Stromerzeuger zur Hausenergieversorgung, als unterbrechungsfreie Stromversorgungen, als Antriebssysteme für Flurförderzeuge sowie zum Antrieb von Personenwagen und Bussen eingesetzt. In Japan hat die breite Markteinführung und industrielle Produktion von Brennstoffzellen bereits begonnen. Mehr als 100.000 Brennstoffzellen-Heizgeräte sind bereits installiert, und die jährlich produzierte Anzahl an Geräten nimmt rapide zu. Darüber hinaus wurde die Serienproduktion von Brennstoffzellen-Fahrzeugen gestartet. In Deutschland ist die Fertigung von Bipolarplatten (BPP), Gasdiffusionslagen (GDL) bzw. Membran-Elektroden-Anordnungen (MEA) bereits teilweise automatisiert. Die Endmontage von Brennstoffzellen-Stacks findet hingegen noch weitestgehend in Handarbeit statt.

## // Brennstoffzellen-Montage: von der Manufaktur zur automatisierten Assemblierung

Die Montage von Brennstoffzellen-Stacks erfordert eine hohe Qualität und minimale Toleranzen bei den zu verbauenden Komponenten sowie hohe Präzision bei der Montage. Der Abstand zweier Zellen beträgt oftmals weniger als 1,5 mm, während die Zellfläche für Automobilanwendungen ca. 300 bis 500 cm² beträgt. Die pro Stack zu verbauende Zellzahl variiert von ca. 20 Zellen für kleine Brennstoffzellensysteme bis zu mehr als 300 Zellen für Brennstoffzellen-Stacks in Automobilsystemen. Während bei Losgrößen von weniger als tausend Stacks eine handwerkliche Fertigung machbar ist, wird bei größeren Stückzahlen oder bei größeren Formaten der Einsatz automatisierter Fertigungsverfahren erforderlich.

Parallel zur Stackmontage müssen Schritte zur Qualitätssicherung der zu montierenden Teile wie z. B. Membran-Elektroden-Anordnungen, Bipolarplatten oder Dichtungen erfolgen, da bereits ein einzelnes fehlerhaftes Teil die Funktion des Stacks beeinträchtigen kann.

#### // Fuel cells – the market launch has begun

Fuel cell systems are increasingly being used as power and heat generators for residential applications, as uninterrupted power supply and as drive systems for material handling as well as for drive trains in cars and buses. In Japan, the broad market launch and industrial production of fuel cells has already begun. More than 100,000 fuel cell heating systems have already been installed, and the annual production of devices is increasing rapidly. In addition, the series production of fuel cell vehicles has started. In Germany, the production of bipolar plates and gas diffusion systems (GDL) or membrane-electrode assemblies (MEA) has already been automated to some degree. By contrast, the end assembly of fuel cell stacks is still carried out mainly manually.

## // Fuel cell installation: from manual production through to automated assembly

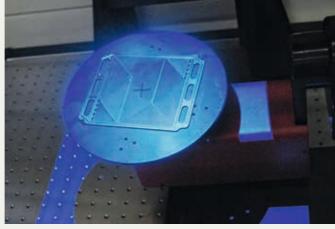
The installation of fuel cell stacks requires high quality and minimum tolerances with regard to the components to be installed as well as high precision levels during installation. The interval between two cells is frequently less than 1.5 mm, while the cell surface for automobile applications is approx. 300 to 500 cm². The number of cells to be installed per stack varies from approx. 20 cells for small fuel cell systems to more than 300 cells for fuel cell stacks in automobile systems. While manual production is possible with batch sizes of less than one thousand stacks, the use of automated production processes is necessary with large volumes or formats.

Parallel to the stack assembly, steps have to be taken for the quality assurance of the parts to be assembled, such as membrane-electrode assemblies (MEA), bipolar plates (BPP) or seals, as even a single defective part can impair the function of the stack.

# // Focus



// Maschinelles Auftragen von Brennstoffzellen-Dichtungen mit Dispenser. // Mechanical application of fuel cell seals with dispenser.



// Charakterisierung mit Streifenlichtprojektion. // Depiction with strip-light projection.

Das ZSW beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Entwicklung und dem Bau von innovativen Brennstoffzellen-Stacks im Leistungsbereich von wenigen Watt bis zu 100 kW für alle Anwendungen. Bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt wurden Themen zur Qualitätssicherung sowie zur stückzahlangepassten Automatisierung der Stackmontage aufgegriffen und an eigenen Stack-Designs erprobt. Im Verlauf dieser Arbeiten ist beträchtliches Know-how bezüglich der automatisierten Handhabung von Bauteilen, der Applikation von Dichtungen sowie dem Fügen und Stapeln von Zellen entstanden. Unsere Brennstoffzellen-Herstelltechniken umfassen Maschinen und Anlagen zur Dichtungs- und Klebetechnik, CAD-Konstruktion, robotergestützte Stackmontage und Stacktests.

Komponenten wie Gasdiffussionslagen, Bipolarplatten und Membran-Elektroden-Einheiten werden in der Regel von den etablierten Herstellern geliefert. Die Anpassung der Stack-Montage an neue Generationen von Komponenten wie auch die Qualitätskontrolle der angelieferten Bauteile erfordern eine Vielzahl an Methoden und Geräten. Hierzu hat das ZSW eine ganze Reihe von Lösungen etabliert:

- > Mit dem "Auto-Stack-Tool" steht eine offene, herstellerunabhängige Plattform zur Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten unter realen Betriebs- und Designbedingungen zur Verfügung. Mit der entsprechend ausgelegten Konstruktion der Testapparatur können neue, fortschrittliche Zellkomponenten schnell adaptiert und getestet werden.
- > Charakterisierungen der mechanischen und der Oberflächeneigenschaften aller Bauteile können vorgenommen werden.
- > Bestimmung der Makro- und Mikrostrukturen von Elektroden mittels verschiedener 3-D-Messtechniken wie Röntgentomographie (CT), Neutronenradiographie und Synchrotrontomographie.
- > Vielfältige Modellierungs- und Simulationswerkzeuge zur Optimierung der Design- und Betriebsparameter.

Bislang hat das ZSW mehr als 900 Brennstoffzellen-Stacks in den verschiedensten Baugrößen hergestellt und damit eine exzellente Basis für Automatisierungstechniken geschaffen.

For many years, ZSW has been involved with the development and construction of innovative fuel cell stacks in the power range of a few watts up to 100 kW for all applications. At a very early stage, subjects related to quality assurance as well as volume-adapted automation of the stack-installation were taken up and tested on ZSW's own stack designs. During the course of this work, considerable know-how has developed concerning the automated handling of components and the application of seals as well as the joining and stacking of cells. Our fuel cell production techniques comprise machines and systems for sealing and adhesion technology, CAD construction, robot-assisted stack installation and stack tests.

As a rule, components such as gas diffusion systems, bipolar plates and membrane-electrode assemblies are supplied by the established manufacturers. The adaptation of the stack installation to new generations of components as well as quality control of the components delivered requires a number of methods and devices. ZSW has developed a whole series of solutions in this respect:

- > The "Auto-stack tool" is an open, manufacturer-independent platform for the characterisation of fuel cell components under real operational and design conditions. New, progressive components can be adapted and tested quickly with the correspondingly designed construction of the test apparatus.
- > Illustrations of the mechanical and surface attributes of all components can be carried out.
- > Determination of the macro and micro-instruments of electrodes using various 3D measuring techniques such as X-ray tomography (CT), neutron radiography and synchrotron tomography.
- > Diverse modelling and simulation tools for the optimisation of the design and operating parameters.

Until now, ZSW has produced more than 900 fuel cell stacks in the most varying sizes and thus created an excellent basis for automation techniques.



#### // Photovoltaik der nächsten Generation

Die solare Stromgewinnung ist ein wichtiger Baustein der Energiewende. Solarzellen werden heute überwiegend aus kristallinem Silizium hergestellt. Demgegenüber weisen Dünnschicht-Technologien und hier insbesondere das Materialsystem CIGS (Cu(In,Ga) Se $_{\rm 2}$  = Kupfer, Indium und/oder Gallium sowie Selen) einige Vorteile auf: Neben einem deutlich geringeren Material- und Energieeinsatz (aufgrund der direkten Bandlücke) wird eine höhere Produktionstiefe vom Glas bis zum fertigen Modul in einer Fabrik erreicht. Diese Faktoren ermöglichen grundsätzlich geringere Herstellungskosten und damit die Chance, am wachsenden Weltmarkt für die Photovoltaik entscheidend zu partizipieren. Aufgrund der geringen Schichtdicke des Absorbers von 2–3  $\mu$ m können zudem auch flexible Solarmodule hergestellt werden. Aus diesen Gründen hat sich das ZSW bei der Herstellung von Solarzellen und -modulen auf das Dünnschicht-Materialsystem CIGS spezialisiert.

Nachdem 1989 an der Universität Stuttgart mit der Methode der Koverdampfung aller vier Metalle bereits Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 17% auf kleiner Fläche gelangen, griff das ZSW diese vielversprechende Technologie auf und führte sie nach erfolgreicher Flächenskalierung zur kommerziellen Umsetzung.

#### // Next-generation photovoltaics

The obtaining of solar power is an important building block of the energy turnaround. Today, solar cells are produced predominantly from crystalline silicon. By contrast, thin-film technologies – and here in particular the CIGS material system (Cu(In,Ga) Se $_2$  = copper, indium and/or gallium as well as selenium) – offer certain advantages: In addition to a considerably lower material and energy input (due to the direct band gap), a higher production depth is achieved from the glass through to the finished module in a factory. These factors fundamentally enable lower manufacturing costs and thus the opportunity to participate in a decisive manner in the growing global market for photovoltaics. The successful thin absorber layer of 2-3  $\mu$ m also enables the production of flexible solar modules. For these reasons, ZSW has specialised in the CIGS thin-film material system for the manufacture of solar cells and modules.

After the University of Stuttgart succeeded in 1989 in achieving solar cells with an efficiency level of 17% on a small surface using the co-evaporation method on all four metals, ZSW took up this promising technology and after upscaling to larger module areas, successfully transferred it to the market.

#### // Aufskalierung der Koverdampfung des CIGS-Dünnschicht-Halbleiters vom Labor bis zur Produktion.

// Upscaling of the co-evaporation of the CIGS thin-film semiconductor from lab through production







#### // Produktionstechnologie für Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS)

Im Fokus des Übergangs vom Labor zu einem industriellen Umfeld steht neben der Skalierung der Fläche insbesondere die Anlagentechnik. Hier besteht die Herausforderung darin, den Halbleiter und die Kontaktschichten statt auf Quadratzentimeter- nun auf Quadratmeter-Substratgröße unter Produktionsbedingungen (hoher Durchsatz und hohe Ausbeute) herzustellen. Am ZSW wurde dafür die Prozess- und Anlagentechnologie konsequent optimiert und effektiv in das industrielle Umfeld transferiert: Nach einer Pilotphase produzierte die Firma Würth Solar bis 2011 CIGS-Solarmodule in einer 30-MW-Fabrik basierend auf der am ZSW entwickelten Technologie. Der heutige Industriepartner Manz AG bietet auf dem Markt schlüsselfertige Produktionslinien zur CIGS-Modulfertigung an.

Die wesentlichen Ansatzpunkte für eine erfolgreiche Marktpositionierung industrieller Partner sind die kontinuierliche Verbesserung des Wirkungsgrades (durch angewandte Grundlagenforschung) sowie die Reduktion der spezifischen Investitionen in Produktionsanlagen (durch beschleunigte Prozessführung). Hierfür stehen am ZSW geeignete Prozessanlagen zur Verfügung.

// Am ZSW hergestelltes CIGS-Dünnschicht-Solarmodul im Format 30 x 30 cm² auf Glas.
// CIGS thin-film solar module manufactured at ZSW – format 30 x 30 cm² on glass.

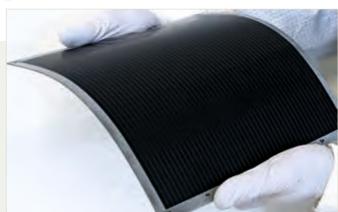


### // Production technology for copper-indium-gallium-diselenide (CIGS)

In addition to the upscaling of the surface area, the focus of the transition from the laboratory to the industrial environment was on plant engineering in particular. The challenge here is to produce the semiconductor and the contact layers at square metre substrate size instead of square centimetres under production conditions (high throughput and high yield). At ZSW, the process and plant engineering was consistently optimised for this and effectively transferred to the industrial environment: following a pilot phase, the company Würth Solar produced CIGS solar modules at a 30 MW factory until 2011, based on the technology developed at ZSW. The current industrial partner Manz AG offers turnkey production lines for the production of CIGS modules.

The fundamental points of reference for the successful market positioning of industrial partners are continuous improvement of the efficiency (through applied basic research) as well as a reduction in specific investments in production facilities (through accelerated process management). ZSW has suitable process facilities for this purpose.

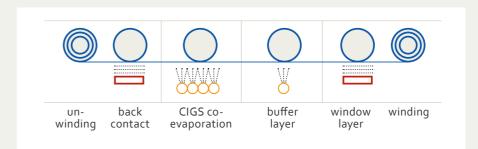
// Flexibles CIGS-Modul auf emailliertem Stahl.
// Flexible CIGS module on enamelled steel.





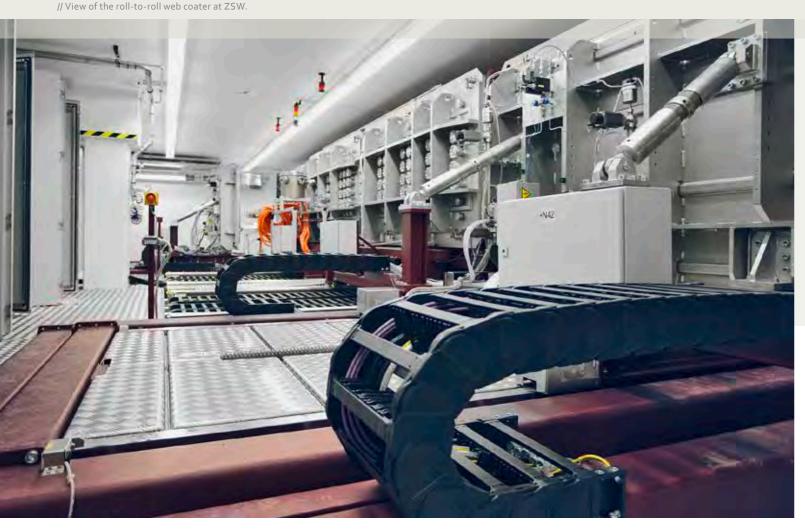
Das benötigte Know-how zum Prozess und das Verständnis des Bauelements werden zunächst auf Quadratzentimeter Fläche an einer CIGS-Laboranlage erarbeitet (s. Abb. S. 26 oben links). Das ZSW hält hier den aktuellen Effizienz-Weltrekord für Dünnschicht-Solarzellen mit 21,7%. Da diese statischen Prozesse jedoch industriell nicht kostengünstig einsetzbar sind, werden spezielle Durchlaufprozesse auf Anlagen mit einer Substratgröße von 30 x 30 cm<sup>2</sup> entwickelt (s. Abb. S. 26 oben Mitte). Am ZSW ist die gesamte Prozesskette zur Herstellung von Solarmodulen umgesetzt. Die in den Durchlaufanlagen auf 30 x 30 cm² Fläche erarbeiteten Prozesse sind somit direkt auf die industriell relevante Substratgröße von 60 x 120 cm<sup>2</sup> skalierbar (s. Abb. S. 26 oben rechts). Um die Kosten weiter zu reduzieren, gelten aktuelle Weiterentwicklungen neben der Steigerung der Wirkungsgrade an Zelle und Modul insbesondere dem Durchsatz an den Anlagen und damit der Prozessgeschwindigkeit. Hier leistet das ZSW grundlegende Vorentwicklungen, um die spätere Umsetzung im industriellen Umfeld zu beschleunigen.

The required know-how concerning the process and the understanding of the building element are initially prepared on a square centimetre area in a CIGS laboratory facility (see the chart on page 26, top left). Here, ZSW holds the current efficiency world record for thin-film solar cells at 21.7%. However, as these static processes cannot be used cost-effectively in industry, special throughput processes are developed on systems with a substrate size of 30 x 30 cm<sup>2</sup> (see the chart on page 26, top centre). At ZSW, the entire process chain is implemented for the production of solar modules. The processes prepared in the throughput systems on a 30 x 30 cm<sup>2</sup> surface are thus capable of direct scaling to the industrially relevant substrate size of 60 x 120 cm<sup>2</sup> (see the chart on page 26, top right). In order to reduce costs further, current developments are aimed in particular at the throughput of the systems and thus at process speed in addition to increasing the efficiency of cell and module. Here, ZSW is carrying out fundamental pre-developments so as to accelerate later development in the industrial environment.



// Schema der Rolle-zu-Rolle-Herstellung flexibler CIGS-Dünnschichtmodule. // Schema of the roll-to-roll web coater for flexible CIGS thin-film modules.

#### // Blick auf die Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage am ZSW.

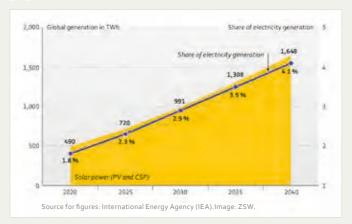


Ersetzt man das in heutigen Modulen gebräuchliche Substratmaterial Glas durch flexible Materialien wie Metall- oder Polymerfolien, so ist es möglich, CIGS-Zellen und -module mit der Rollezu-Rolle(R2R)-Technologie herzustellen (s. Grafik S. 27). Diese Technologie verspricht weitere Kostenvorteile. Hierfür steht am ZSW eine für Folien mit einer Breite von 30 cm ausgelegte R2R-Anlage zur Verfügung, die nach dem "all-in-one"-Prinzip vollständige Solarzellen herstellen kann. Derzeit wird in dieser Anlage mit modifizierten CIGS-Vakuumprozessen eine Machbarkeitsstudie durchgeführt, um einen auf Prozessdaten basierten Kostenvergleich zur herkömmlichen Technologie erstellen zu können.

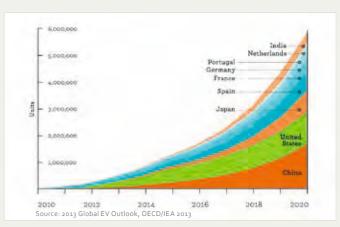
Das ZSW deckt die gesamte Prozesskette der Photovoltaik von der Entwicklung neuer Materialien über die Begleitung von Industrieprozessen bis hin zur Qualitätsprüfung und Anwendung im Feld ab. Die Felddaten sind die Basis für weitere Modifikationen der Prozesse und dienen letztlich der Verbesserung der Produkte. If one replaces the substrate material glass, customary in today's modules, by flexible materials such as metals or polymer films, it is possible to produce CIGS cells and modules with the roll-to-roll (R2R) technology (see the chart on page 27). This promises additional cost advantages. To this end, ZSW has a R2R system designed for films with a width of 30 cm which can produce complete solar cells in accordance with the "all-in-one" principle. A feasibility study is currently being carried out on this system with modified CIGS vacuum processes, in order to enable the preparation of a cost comparison to conventional technology based on process data.

ZSW covers the entire process chain of photovoltaics, from the development of new materials via the accompaniment of industrial processes through to quality checking and application in the field. The field data form the basis for further modifications of the processes, and ultimately serve to improve the products.

# // Focus



// Ausblick für die weltweite Solarstrom-Produktion und ihren Anteil an der gesamten Stromerzeugung von 2020 bis 2040. // Outlook for the global production of solar electricity and its share in overall electricity generation from 2020 to 2040.



// Regierungsziele zu den jährlichen Verkaufszahlen für Elektrofahrzeuge (für Batterieelektrische- und Plug-in-Hybridfahrzeuge. // Governmental sales targets for electric vehicles (BEV and HEV).

#### // Ausblick

Schätzungen gehen davon aus, dass die weltweiten Investitionen in erneuerbare Energien im Jahr 2014 auf über 300 Mrd. US-Dollar gestiegen sind. Fast die Hälfte dieser Summe entfiel auf Solarenergie. Die Solarinvestitionen stiegen damit im Jahr 2014 um 25% auf ein Gesamtvolumen von rund 150 Mrd. US-Dollar. Ende 2014 stellte die Photovoltaik weltweit bereits 1% der Stromerzeugung. Selbst die als konservativ geltende International Energy Agency (IEA) sieht hier ein Potenzial von über 4% bis 2040 (s. Grafik oben links). Die globale Energiewende wird damit auf der Erzeugungsseite künftig vor allem von Wind- und Solarenergie getragen.

Im Bereich Energiespeicher, Energieeffizienzprodukte und Elektroautos stiegen die Investitionen um 10 % auf 37 Mrd. US-Dollar. Der weltweite Markt für Lithium-Ionen-Batterien für alle Anwendungen wird sich von heute etwa 15 Mrd. Euro in wenigen Jahren verdoppeln und auch langfristig sehr hohe Wachstumsraten aufweisen. Auch bei Brennstoffzellen hat der weltweite Umsatz die Milliardengrenze überschritten.

Nach einer Studie der IEA aus dem Jahr 2013 (s. Grafik oben rechts) soll die Zahl produzierter Elektrofahrzeuge nach den Zielen weltweiter Regierungsprogramme im Jahr 2020 die 5-Millionen-Grenze überschreiten. Der Vergleich mit den Ist-Werten für 2014 zeigt, dass die Realität um mehr als ein Jahr hinterherhinkt (s. Grafik S. 17 unten links). Dennoch, bei den aktuellen Wachstumsraten wird der Batteriemarkt für Elektromobilität bis 2020 auf etwa 15 Mrd. Euro steigern. Und das ist erst der Anfang der Marktdurchdringung.

Bei all diesen Technologien handelt es sich um Schlüsseltechnologien für die Energiewende und die Mobilität von morgen. Deutschland kann sich mit seiner breiten Expertise in der Materialforschung, seinem weltweit anerkannten Maschinenbau und der hochinnovativen Automobilindustrie eine starke Position aufbauen. Das betrifft sowohl die wichtige einheimische Wertschöpfung wie auch strategisches Know-how in Schlüsseltechnologien für Industrieprodukte von morgen.

#### // Outlook

Estimates assume that global investments in renewable energies have risen to over 300 billion US dollars in 2014. Almost half of this amount was accounted for by solar power. Solar investments therefore increased by 25% in 2014 to a total volume of around 150 billion. At the end of 2014, solar power already accounted for 1% of electricity generation worldwide. Even the IEA, with its reputation as being conservative, sees potential of over 4% here by 2040 (see the chart above, left). On the producer side, the global energy turnaround will therefore be driven above all by wind and solar power.

Investments in energy storage systems, energy efficiency products and electric vehicles rose by 10% to 37 billion US dollars. The global market for lithium-ion batteries for all applications will double from the current level of approx. 15 billion euros in just a few years and will also demonstrate very high growth rates in the long term. Global sales of fuel cells have also passed the billion mark.

Corresponding a IEA study in 2013 (the chart above, right), in accordance with governmental sales targets the number of electric vehicles produced will exceed 5 million units in 2020. A comparison with the actual values indicates that the reality is more than one year behind that (see the chart on page 17, bottom left). However, with the current growth rates the battery market for electric vehicles will rise up to 15 billion euros in 2020, and this is only the beginning to make a break through.

All these technologies are key technologies for the energy turnaround and future mobility. Germany can build up a strong position through its broad-based expertise in materials research, its globally reputed machine engineering and its highly innovative automobile industry. This concerns both the important added value at home as well as strategic know-how in key technologies for industrial products of tomorrow.



# // Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)



#### // Unsere Kernkompetenzen

Die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende war auch im Jahr 2014 das beherrschende energiepolitische Thema in Deutschland. In Politik und Wissenschaft wurde weiter intensiv über die Marktund Systemintegration erneuerbarer Energien und den resultierenden Bedarf an Flexibilitätsoptionen für das zukünftige Energiesystem debattiert. Daneben rückte die drohende Verfehlung der Klimaschutzziele für 2020 und die Bedeutung der Energieeffizienz – insbesondere im Wärme- und Verkehrssektor – für den Erfolg der Energiewende in den Mittelpunkt des Interesses. Das interdisziplinär besetzte Fachgebiet Systemanalyse berät in allen skizzierten Themenfeldern die Politik gezielt mit seinem Fachwissen und trägt so aktiv zum Fortschritt der Transformation des Energiesystems in Deutschland bei. Neben zahlreichen Aktivitäten im Bereich des Monitorings – vom Ausbau der erneuerbaren Energien im Rahmen der AGEE-Stat bis zur Unterstützung von Prof. Dr. Frithjof Staiß als Mitglied der von der Bundesregierung eingesetzten Expertenkommission zum Monitoringprozess "Energie der Zukunft" – ist die Evaluation von Förderinstrumenten eine Kernkompetenz des Fachgebiets. So wurde die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums (BMWi) zum vierten Mal fachlich begleitet und koordiniert. Zudem werden die Kompetenzen seitens des BMWi intensiv für die perspektivische Ausgestaltung dieses Förderinstruments als Ausschreibungsmodell nachgefragt.

Auf Landesebene unterstützt das Fachgebiet die Umsetzung der Energiewende auch aktiv im Themenfeld Energieeffizienz. Hierzu zählt die Erarbeitung eines Kraft-Wärme-Kopplungs-Konzepts ebenso wie die erstmalige Durchführung des Wettbewerbs "Leitstern Energieeffizienz" auf Kreisebene. Zur Analyse von Fragen zur Integration erneuerbarer Energien und neuer Technologien werden unterschiedliche Modelle und Analysetools eingesetzt. So wurde u. a. ein Restwertmodell für Fahrzeugbatterien entwickelt, das die Bewertung möglicher Second-Life-Anwendungen erlaubt. Leistungsfähige Vorhersagesysteme für die Einspeisung von Windund Photovoltaikstrom vervollständigen das Kompetenzprofil.

// Our main focus

Once again, the successful realisation of the energy transition was the dominant energy policy topic in Germany in 2014. Politics and science continued their intense debates surrounding the market and system integration of renewable energy sources and the resulting need for flexibility options for the future energy system. In addition, the threat of missing the climate protection goals for 2020 and the importance of energy efficiency – especially in the heating and transport sectors – and the resulting impact on the success of the energy transition shifted into focus. The interdisciplinary Systems Analysis department provides expert advice to the government on all topics outlined and actively contributes to the progress of the energy system transition in Germany. In addition to numerous activities in the area of monitoring – from the expansion of renewable energy sources within the framework of AGEE-Stat to support for Prof. Dr. Frithjof Staiß as a member of the Expert Commission set up by the Federal Government for the monitoring process "Energy of the Future" – the evaluation of support instruments is a core competency of the department. The amendment to the Renewable Energy Sources Act (EEG) on behalf of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) was supported technically, and coordinated for the fourth time. Moreover, BMWi has a high demand for expertise in the perspective design of the subsidy instrument as a tender model.

On a regional level, the department also actively supports the implementation of the energy transition in the area of energy efficiency. This includes developing a cogeneration concept as well as holding the first ever "Leitstern Energieeffizienz" (Guiding Star: Energy Efficiency) competition at a district level. Various models and analysis tools are used to examine issues concerning the integration of renewable energy and new technologies. For example, a salvage model for vehicle batteries has been developed that allows for the evaluation of potential second life applications. Sophisticated forecasting systems for wind and photovoltaic power feed-in complete our competency profile.



"Die Energiewende ist aufgrund ihrer Komplexität auf umfassendes transformatives Wissen angewiesen. Für ihren Erfolg ist die Systemanalyse deshalb von großer Bedeutung, weil sie das bietet und entsprechende Impulse geben kann." "The energy transition depends on comprehensive transformative knowledge due to its complexity. Systems analysis is of great importance for its success because it offers just that and the corresponding stimulus."

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maike Schmidt, Head of Department
E-mail: maike.schmidt@zsw-bw.de, Phone: +49 (0) 711 78 70-232

# // Ausgestaltung eines Pilot-Ausschreibungssystems für Photovoltaik-Freiflächenanlagen

Das Fachgebiet Systemanalyse unterstützte zusammen mit verschiedenen Projektpartnern das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) bei der Ausgestaltung eines Ausschreibungssystems für Photovoltaik(PV)-Freiflächenanlagen.

Im Zuge der EEG-Reform 2014 wurde festgelegt, dass die Ermittlung der Förderhöhe für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2017 auf Ausschreibungen umgestellt werden soll. In einem ersten Schritt soll das Segment der PV-Freiflächen auf eine wettbewerbliche Ermittlung der Förderhöhe umgestellt werden. Damit wird die bislang administrative Festlegung der Fördersätze abgelöst.

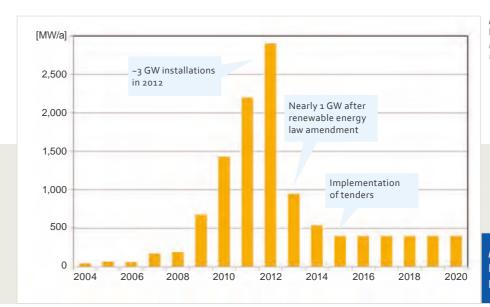
Der Zubau von Freiflächenanlagen ist bis zum Jahr 2012 stark gewachsen und nach Inkrafttreten der EEG-Novelle 2013 auf knapp 1 GW eingebrochen (s. Grafik). Im Jahr 2014 war der Zubau weiter rückläufig, da die Degression der Vergütungssätze schneller voranschritt als die Preisentwicklung der Anlagen. Bereits im Laufe des Jahres 2015 sollen die ersten Ausschreibungsrunden für PV-Freiflächenanlagen durchgeführt werden. Zur Vorbereitung wurden dem BMWi zahlreiche Empfehlungen vorgelegt, mit denen die Ausbauziele zu geringen Kosten, mit hoher Effizienz sowie ausreichend hoher Wettbewerbsintensität erreicht werden können.

## // Design of a pilot tender system for ground-mounted photovoltaic systems

The Systems Analysis department and various project partners supported the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) in designing a tendering system for ground-mounted photovoltaic (PV) systems.

In the course of the EEG amendment in 2014, it was decided that determination of the subsidy amount for electricity generation from renewable energy will be changed to be based on tenders by 2017. In a first step, the PV ground-mounted segment will be converted to a competitive determination of the subsidy volume. The current administrative determination of subsidy rates will be replaced.

The number of new ground-mounted systems increased considerably until 2012 and plummeted to almost 1 gigawatt after the EEG amendment entered into force in 2013 (see the chart). In 2014, the number of new systems was decreasing because the degression of the remuneration rates progressed faster than the price development of the systems. As soon as 2015, the first calls for ground-mounted PV systems are to be implemented. In order to prepare for this, BMWi received numerous recommendations with which the expansion targets can be achieved at low cost, high efficiency and a sufficiently high level of competition.



// Bisheriger und zukünftig geplanter Zubau von PV-Freiflächenanlagen in Deutschland (Quelle: ZSW). // Previous and prospective installations of groundmounted PV systems in Germany (source: ZSW).

// Tobias Kelm E-mail: tobias.kelm@zsw-bw.de Phone: +49(0)711 78 70-250



## // Erstellung eines Modells für die Ermittlung eines Restwerts für gebrauchte Elektrofahrzeugbatterien

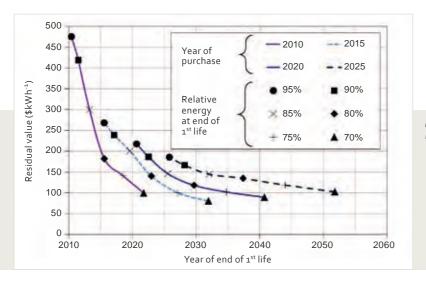
Das Fachgebiet Systemanalyse unterstützte das ZSW-Fachgebiet ECA beim Verbundprojekt NET-INES (Netzintegration mobiler Energiespeicher), das ECA zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich (Projektleitung) und der TU Berlin durchführt. Ziel des Projekts ist es, technische, ökonomische und motivationale Voraussetzungen für die Netzintegration mobiler elektrischer Energiespeicher aus Traktionsbatterien aus Elektrofahrzeugen und ihren diesbezüglichen Einsatz (vehicle-to-grid) zu erarbeiten, die den Anforderungen von Batterie und Stromnetz und den Erwartungen potenzieller Halter von elektrischen Fahrzeugen gerecht werden.

Aufgabe der Systemanalyse war die Erstellung eines technoökonomischen Modells für die Ermittlung eines Restwerts für gebrauchte Elektrofahrzeugbatterien, die in einer Second-Life-Anwendung wie z. B. in einem stationären Energiespeichersystem weiterverwendet werden können. Antriebsbatterien, die aus der Automobilanwendung ausgeschieden sind, weisen nämlich in der Regel genügend hohe Restkapazitäten auf, die den Anforderungen eines Einsatzes in einer Second-Life-Anwendung genügen. Wichtigster Inputfaktor für die Kalkulation des Restwerts ist die Alterung der gebrauchten Batterie, die ECA mit Hilfe eines eigenen Alterungsmodells in Abhängigkeit von der Batterienutzung in der Automobilanwendung simulieren kann. Die Simulationen des Modells haben gezeigt, dass der Restwert einer gebrauchten Elektrofahrzeugbatterie aufgrund der zukünftig fallenden Batteriekosten perspektivisch sinkt. Das eröffnet die Möglichkeit, diese Batterien in stationären Zweitanwendungen kostengünstig z.B. für die Erbringung von Netzdienstleistungen einzusetzen (s. Grafik).

# // Creation of a model for calculating the salvage value of used electric vehicle batteries

The Systems Analysis department supported ZSW's ECA department with the joint project, NET-INES (grid integration of mobile energy storage systems), which is being carried out by ECA together with Forschungszentrum Jülich (project management) and the Technical University of Berlin. The aim of the project is to develop technical, economic and motivational conditions for the grid integration of mobile electrical energy storage systems with traction batteries from electric vehicles and their related application (vehicle-to-grid) that meet the requirements of the battery and the grid as well as the expectations of potential electric vehicle owners.

The task of the Systems Analysis research department was to develop a techno-economic model for determining a salvage value of used electric vehicle batteries that can be further used in a second life application, for example in a stationary energy storage system. Drive batteries no longer used in automobiles generally have sufficiently high residual capacities and meet the requirements of second life application. The most important input factor in the calculation of the salvage value is the ageing of the used battery, which ECA can simulate using their own ageing model as a function of battery usage in automotive application. Simulations of the model have shown that the salvage value of a used electric vehicle battery will likely decrease due to falling battery costs in the future. This allows for the possibility of using these batteries cost-effectively in stationary secondary use applications, for example for providing grid services (see the chart).



// Simulationsergebnisse des Restwertmodells. // Simulation results of the salvage value model.

> // Michael Taumann E-mail: michael.taumann@zsw-bw.de Phone: +49(0)711 7870-329

#### // EE-Leistungsprognoseportfolio erweitert und verbessert

Das Produktportfolio des ZSW für operationelle Leistungsprognosen für die Einspeisung von erneuerbaren Energien (EE) wurde 2014 wesentlich erweitert und verbessert. Die Vermarktung der Prognosen mit stündlicher Aktualisierung übernimmt hierbei ein Unternehmen aus dem Bereich der Wetterdienstleistungen. Im Jahr 2014 wurden vom ZSW neben Windleistungsprognosen auch erstmals PV-Einspeiseprognosen für räumlich verteilte PV-Portfolios in den vier deutschen Regelzonen sowie für Deutschland insgesamt operationell erstellt.

Für die Bewertung der Vorhersagegüte der Wind- und PV-Einspeisung wird meist der normierte mittlere quadratische Fehler (nRMSE) bezogen auf die installierte Leistung verwendet. Für die ZSW-PV-Leistungsprognose Deutschland beträgt der nRMSE im Jahr 2014 2,9 % (s. Grafik).

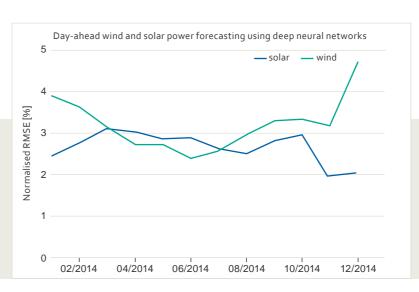
Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) geförderten Vorhabens WindSage wurde auch die Windleistungsprognose deutlich verbessert. Mit der Einbeziehung von Daten weiterer Wettermodelle wurde der nRMSE für die Deutschlandvorhersage von ca. 4,5% auf 3,4% für das Jahr 2014 verbessert. Eine weitere Verringerung des Vorhersagefehlers und die Optimierung von Kürzestfristprognosen der Wind- und PV-Leistung sind im Projekt WindSage zu erwarten. Im BMWi-geförderten Vorhaben VORKAST steht die Entwicklung neuer Verfahren für die Kürzestfristvorhersage der Wind- und PV-Leistung für die Optimierung des Betriebs von Kombikraftwerken im Vordergrund. Diese Entwicklungen werden eine weitere Verbesserung der ZSW-Leistungsprognosen für Wind und PV mit sich bringen.

#### // RE power forecast portfolio expanded and improved

ZSW's product portfolio of operational power forecasts for the supply of renewable energy was expanded and improved considerably in 2014. The marketing of forecasts with hourly updates is carried out by a weather service company. In 2014, PV feed-in forecasts were created by ZSW for the first time, in addition to wind power forecasts, for geographically distributed PV portfolios in the four control zones as well as – operationally – for Germany.

The normalised root-mean-square error (nRMSE) relating to the installed capacity is usually used to evaluate the forecast quality of wind and PV feed-in. The nRMSE was 2.9% for Germany in 2014 for the ZSW PV power forecast (see the chart).

As part of the WindSage project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), wind power forecasts were also significantly improved. With the inclusion of data from additional weather models, the nRMSE has been improved from approx. 4.5% to 3.4% for German forecasts for 2014. A further reduction of the forecast error and an optimisation of very short range forecasts of wind and photovoltaic power can be expected from the WindSage project. In the BMWi-funded project VORKAST, the main focus is on the development of new methods for very short range forecasts of wind and PV power to optimise the operation of hybrid power plants. These developments will lead to further improvements of ZSW power forecasts for wind and PV.



// Mittlerer quadratischer Fehler normiert auf die installierte Leistung (nRMSE) für Day-ahead-Wind- und -PV-Prognosen für Deutschland im Jahr 2014. Der Vorhersagefehler für die Windleistungsprognose konnte auf 3,4% im Jahresmittel gesenkt werden.

If I nRMSE normalised with the installed capacity for day-ahead wind and PV forecasts for Germany in 2014. The forecast error for wind power forecasts was lowered to 3.4% for the annual average.

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

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

# // Technologietransfer bei CIGS-Dünnschicht-Solarzellen auf Glas Technology transfer with CIGS thin-film solar cells on glass substrates

#### // 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 Drucktechnologien werden für neue organische und anorganische Halbleitersysteme wie Kesterite und Perowskite 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 Analytikaufgaben (z. B. hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse), die Abscheidung von elektrischen Kontaktschichten sowie die elektrische und optische Charakterisierung von Zellen und Modulen.

// 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 application of flexible substrate materials such as polymer and metal films instead of the glass substrates predominantly used today is being developed in a second technical lab for roll-to-roll coating. The manufacture and optimisation of these flexible CIGS modules form the focus of the FLEXIS working group.

New cost-effective deposition processes such as print technologies are being developed for new organic and inorganic semiconductor systems in a 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.

// Optimierung von Prozessgeschwindigkeiten, Schichtzusammensetzungen und Langzeitstabilität für die Produktion

Im Themenfeld fabrikationsnahes CIGS unterstützen wir insbesondere die Industrie beim Betrieb einer Innovationslinie, die zur Qualifizierung und Erprobung aller Prozesse bei der Modulherstellung dient. Die Methode zur Herstellung von 60 x 120 cm² großen CIGS-Modulen auf Glas basiert auf der Technologie des ZSW. Aufgrund der gestiegenen Anforderungen des Marktes sind die höchstmöglichen Prozessgeschwindigkeiten und die maximalen Produktionslaufzeiten der Maschinen wichtige Themen. Mit Hilfe der gut ausgestatteten Analytik am ZSW wird dann u. a. untersucht, ob und wie sich im Verlauf sehr langer Batches eine Änderung ergibt, z. B. bei der Zusammensetzung über die Schichtdicke, bei den elektro-optischen Eigenschaften oder der Langzeitstabilität. Gegebenenfalls ergänzt durch Simulationen der komplexen Zell-Heterostruktur lassen sich daraus Empfehlungen für die Prozessführung ableiten. Besonders wertvoll ist dabei die Expertise aus unserer eigenen Modullinie für 30 x 30 cm² große Module, die für alle Schritte industrierelevante Prozesse einsetzt und kontinuierlich weiterentwickelt wird. Hier konnte z. B. die für die Zellverschaltung notwendige Fläche, die für die Stromgewinnung verloren geht, deutlich reduziert werden (s. Abb. unten).

Neben der Begleitung des Herstellungsbetriebs entwickelt die Arbeitsgruppe die eingesetzten Methoden und Materialien weiter. Sobald die Prozesse auf Kleinzellen im Labormaßstab erfolgreich sind, werden sie zunächst auf die eigene Inline-Beschichtungsanlage und schließlich in eine Produktionsumgebung übertragen, die ganz andere Randbedingungen und Herausforderungen mit sich bringt.

// Optimisation of process speeds, layer compositions and long-term stability for production

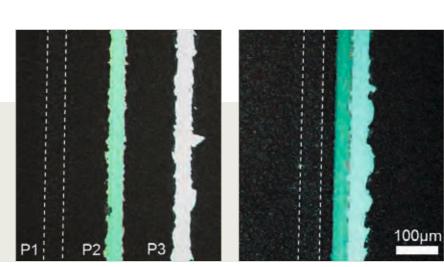
In the area of production-related CIGS, we support the industry with the operation of an innovation line that serves to qualify and test all processes needed in module production. The method for the manufacture of 60 x 120 cm<sup>2</sup> CIGS modules on glass is based on ZSW technology. Due to the risen demands of the market, the highest possible process speeds and maximum production uptimes of the machines are important factors. Using the well-equipped analytics equipment at ZSW among other things, whether and how there is a change in the course of very long batches is then examined, for example in the layer composition, electro-optical properties or long-term stability. Recommendations for process control can be derived, complemented by simulations of the complex cell heterostructure where required. The expertise gained from our own 30 x 30 cm<sup>2</sup> module line is particularly valuable as it relies on industrially relevant processes in all steps and is evolving continuously. As an example, the cell surface area required for cell connections and thus lost for electricity generation could be significantly reduced (see the figure below).

In addition to accompanying CIGSFab operation, the working group further develops the methods and materials that are used. Once the processes are proven successful in small cells in the laboratory, they are first transferred to our own in-line coating system and then to a production environment that is accompanied by entirely different constraints and challenges.



"Wir verbessern im Labor kontinuierlich den Wirkungsgrad unserer CIGS-Zellen und übertragen neue Erkenntnisse auf Produktionsprozesse beim Kunden. Ebenso forschen wir an den nächsten Generationen hocheffizienter und kostengünstiger PV-Module." "We are continuously improving the efficiency of our CIGS cells and transfer new insights to our clients' production processes. We are also researching the next generation of highly efficient and cost-effective PV modules."

// Dr. Wiltraud Wischmann, Head of Department E-mail: wiltraud.wischmann@zsw-bw.de, Phone: +49 (0)71178 70-256



// Verschaltungsbereich eines CIGS-Moduls (Linien P1-P3) mit üblichen (links) und reduzierten Linienabständen (rechts) in einem Lichtmikroskopbild.

// Light microscope image of the connection area of a CIGS module (lines  $P_1-P_3$ ) with conventional (left) and reduced line gaps (right).

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



#### // Hohe Anforderungen an Materialien und Prozesse

Im Jahr 2014 wurde das vom BMWi geförderte Verbundprojekt "Flexible Dünnschicht-Solarzellen für die Raumfahrt – PIPV2" abgeschlossen. Ziel der Projektpartner war es, leichte und flexible CIGS-Dünnschicht-Solarzellen auf 25 µm dünner Polymerfolie für Weltraumanwendungen zu entwickeln. Neben der Effizienz lag der Schwerpunkt auf dem Bau und dem Test der Bauteile. Die weltraumspezifischen Anforderungen unterscheiden sich dabei deutlich von denjenigen terrestrischer Anwendungen: Aufgrund der fehlenden Atmosphäre ist z. B. eine spezielle Beschichtung der Zellen notwendig, die die Solarzellen durch verstärkte Abstrahlung im Infraroten ("high emissivity coating") vor Überhitzung schützt (s. Abb. oben). Der besondere Nutzen von CIGS-Solarzellen für Weltraumanwendungen liegt neben ihrer hohen spezifischen Leistung (W/kg) bzw. ihrer geringen Flächendichte (kg/m²) in der hohen Stabilität gegen Elektronen- und Protonenbestrahlung.

Im Rahmen des Projekts wurde die ZSW-eigene, auf 30 cm Beschichtungsbreite ausgelegte Rolle-zu-Rolle-Anlage mit zusätzlichen Linear-Verdampferquellen ausgestattet, die nicht nur einen mehrstufigen CIGS-Abscheideprozess, sondern auch die nachträgliche Dotierung durch Verdampfen von NaF erlauben. Spezielle Aufgabe des ZSW war die Herstellung monolithisch verschalteter Kleinmodule ohne Metallgitter, die mit den von Partnern hergestellten Einzellern mit Gitter (4 cm x 8 cm) verglichen und jeweils zu einem flexiblen Generator verschaltet wurden. Das ZSW demonstrierte im Projekt einen Modulwirkungsgrad von 10 % (aktive Fläche), während der beste Kleinzellenwirkungsgrad bei 13,5% lag (mit Antireflexbeschichtung, s. Grafik).

#### dark nsity (mA/cm<sup>2</sup>) n = 13.5% -10 $J_{sc} = 33.7 \, \text{mA/cm}^2$ $V_{00} = 564 \,\text{mV}$ FF = 70.7%-20 $A = 0.52 \text{ cm}^2$ -30 0.5 -0.1 0.0 0.2 0.4 Voltage (V)

#### // High requirements for materials and processes

In 2014, the BMWi-funded project "Flexible Dünnschichtsolarzellen für die Raumfahrt – PIPV2" (Flexible thin-film solar cells for space applications - PIPV2) was completed. The aim of the project partners was to develop light and flexible CIGS thin-film solar cells on 25 microns thin polymer film for space applications. In addition to efficiency, the focus was on component construction and testing. Space-specific requirements differ significantly from those of terrestrial applications: due to the lack of an atmosphere, for example, a special cell coating in the form of a high emissivity coating is required to protect the solar cells from overheating through increased emission in the infrared range (see image above). All materials used must also be specified for space application, which means they are not allowed to outgas or degrade as a result of exposure to ultraviolet radiation. The specific benefit of CIGS solar cells for space applications is high performance, low surface density and high resistance to electron and proton irra-

As part of the project, ZSW's own roll-to-roll system, designed for a coating width of 30 cm, was equipped with additional linear evaporation sources, which allow not only for a multi-stage CIGS deposition process, but also for subsequent doping by way of NaF evaporation. ZSW's task was the production of monolithically interconnected small modules without metal meshes, which were compared with single cells with meshes manufactured by partners (4 cm x 8 cm) and then connected to form a flexible generator. In this project, ZSW demonstrated a module efficiency level of 10% (active area), while the best small cell efficiency level was at 13.5% (with an anti-reflective coating, see the chart).

> // Kennlinie der besten Zelle auf Polymerfolie mit einem Wirkungsgrad von 13,5 % (mit Antireflexbeschichtung). // Characteristic curve of the best CIGS cell on a polymer film with an efficiency of 13.5% (with an anti-reflective

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

#### // Leistungsfähiges Testmodul entwickelt

Organische Polymer-Solarzellen basieren auf einer Mischung donorund akzeptorartiger organischer Halbleiter. Ähnlich wie beim gedruckten CIGS lassen sich auch diese Materialien ohne aufwendige und teure Vakuumtechnik durch schnelle und einfache Druckprozesse aus "Tinten" aufbringen. Sie versprechen daher eine erhebliche Senkung der Herstellungskosten von Dünnschicht-Solarmodulen.

Das ZSW erforscht verschiedene Aspekte der Zellphysik, der Stabilität, der Wirkungsgradsteigerung und der Aufskalierung der Herstellungsprozesse (z. B. mittels Rakeln oder Schlitzgießen) bis hin zur Prototypentwicklung. Mit lösungsprozessierten Polymeren und Oligomeren konnten am ZSW jeweils Laborzellen mit Wirkungsgraden von bis zu 7 % realisiert werden. Da für eine Kommerzialisierung die Herstellung aus halogenfreien Lösemitteln erforderlich ist, sucht das ZSW auch nach umweltfreundlichen Alternativen für die bisher verwendeten halogenhaltigen Lösemittel – in enger Zusammenarbeit mit Industrie und Hochschulen.

Um den Wirkungsgrad von Polymer-Solarzellen steigern zu können, möchte man das Sonnenspektrum durch sogenannte Tandemstrukturen optimal nutzen. Hierzu werden zwei Einzelzellen mit unterschiedlichem spektralem Empfindlichkeitsbereich direkt übereinander aufgebracht ("Tandem"), um dadurch bei gleichem Strom die nutzbare Zellspannung idealerweise zu verdoppeln. Dadurch sollten Wirkungsgrade bis zu 15 % möglich werden. Das ZSW arbeitete 2014 im Verbund mit anderen Partnern an der Realisierung dieser organischen Tandemzellen. Die Abbildung unten zeigt ein Testmodul aus solchen Tandemzellen – es erreicht durch die interne Verschaltung eine beachtliche Spannung von über 20 V.

#### // High-performing test module developed

Organic polymer solar cells are based on a mixture of donor-like and acceptor-like organic semiconductors. Similar to printed CIGS, these materials can be applied using quick and simple printing processes with "inks" without having to rely on complex and expensive vacuum technologies. These materials promise a significant reduction in the production costs of thin-film solar modules.

ZSW is conducting research into cell physics, stability, efficiency improvements and the up-scaling of the production processes (for example, using squeegees or slot die coating) and prototype development. ZSW was able to realise efficiencies of up to 7% with laboratory cells using solution-processed polymers and oligomers. Since production with halogen-free solvents is required for commercialisation, the team is also looking for environmentally friendly alternatives to halogenated solvents used to date - in close cooperation with universities and industry.

In order to increase the efficiency of polymer solar cells, one aims to optimally leverage the entire solar spectrum with so-called tandem structures. Two single cells with different spectral sensitivities can be stacked ("tandem") to double the useful cell voltage at the same current under ideal conditions. This should allow for an efficiency of up to 15%. In 2014, ZSW cooperated with partners to realise these organic tandem cells. The image below shows a test module composed of such tandem cells – thanks to its internal connections, it achieved a considerable voltage of more than 20 V.



// Solarmodul aus Tandemzellen mit organischem Halbleiter. // Tandem solar module with

// 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)

# // Sahara-Bedingungen in Süddeutschland

Sahara-like conditions in the south of Germany



Die Qualität und Stabilität von Photovoltaik(PV)-Modulen sowie der optimierte Einsatz von Solarstrom im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder des Fachgebiets MSA und seiner Kunden. Auf der Basis von über 25 Jahren Testerfahrung mit 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 der hochaufgelösten Bestimmung von Degradationseffekten unter Freifeld-Betriebsbedingungen korreliert. 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 von finanzierenden Banken, Projektierern oder Betreibern.

Um den Wert der regenerativen, aber fluktuierenden Energien zu erhöhen, befasst sich das Fachgebiet mit der intelligenten Steuerung von Lasten und Speichern, abhängig von vorhergesagten Lastprofilen und Erzeugungsprofilen aus Solar- und Windstrom. Dadurch erhöht sich die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen für Hauseigentümer und Industrie; gleichzeitig kann die Netzbelastung reduziert und das Profil des vom Energieversorger zu beziehenden Reststroms aus Kostensicht optimiert werden. Das Fachgebiet berät bei der Entwicklung und beim Test entsprechender Algorithmen und Geräte.

// Our main focus

The quality and stability of photovoltaic (PV) modules and optimised utilisation of solar power in the energy system are the two major topics of the MSA research department and its clients. Based on over 25 years of testing experience with photovoltaic (PV) modules made of 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 high-resolving degradation effects under outdoor operating conditions. 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 quality control of PV modules and impact analysis of interference factors (climate, mechanical loads, soiling and electrical voltage), our consultancy expertise includes inspections (due diligence) of largescale PV installations and PV production facilities on behalf of financing banks, project developers and operators.

In order to increase the value of renewable but fluctuating energies, the department deals with the smart control of loads and storage systems depending on predicted load and generation profiles of solar and wind power. This results in increased PV system efficiency for homeowners and industry; at the same time, grid load is reduced and the profile of the residual energy to be purchased from the utilities can be optimised from a cost perspective. The department advises on the development and testing of corresponding algorithms and devices.

// Neues Prüfungsverfahren für die Stabilität von Solarmodulen in heißen Klimazonen

Mit dem 3X-Spiegelkonzentrator auf dem ZSW-Testfeld Widderstall können Photovoltaikmodule im Freifeld unter stark erhöhten Belastungen getestet werden, die den Bedingungen im Sonnengürtel der Erde nahekommen. Der Konzentrator mit beidseitigen Spiegeln wird motorisch der Sonne nachgeführt. Dabei erreicht die Bestrahlungsstärke auf den Testmodulen bis zu 3.000 W/m², wobei die Betriebstemperaturen durch sensorgeregelte Belüftung auf 60 °C begrenzt werden. Die im Jahresverlauf empfangene Einstrahlung ist etwa zweieinhalbmal höher als auf einem optimal nach Süden ausgerichteten Modul und kommt mit mehr als 2.000 kWh/m² derjenigen in Südeuropa oder Nordafrika gleich. Die typischen Modultemperaturen von 50–60 °C entsprechen ebenfalls diesen Standorten.

Durch die in Süddeutschland häufig auftretenden Wettersituationen mit wechselnder Bewölkung und rasch veränderlicher Einstrahlung wird hier zusätzlich eine größere Anzahl von Zyklen der Modultemperatur und damit der thermisch-mechanischen Spannungen provoziert, als es in der Sahara oder an einem anderen südlichen Standort der Fall wäre. Insgesamt ermöglicht es die durch den Spiegelkonzentrator erzeugte erhöhte Belastung der Testmodule, diese am mitteleuropäischen Freifeld-Standort in kürzerer Zeit bezüglich ihrer Stabilität zu testen und eventuelle Schwachstellen an der Modulkonstruktion oder dem PV-Halbleiter schneller zu erkennen.

// New test method for the stability of solar modules in hot climate zones

With the 3X concentrating mirror at ZSW's Widderstall testing facility, photovoltaic modules can be tested in the field under heavily increased loads that are close to the conditions encountered across the earth's sun belt. The double-sided concentrating mirror tracks the sun with a motor. Irradiance achieved on the test modules reaches 3,000 W/m²; operating temperatures are limited to 60 °C with sensor-controlled ventilation. The irradiance received in the course of a year is about two and an half times higher than that of a module optimally oriented to the south and is more like that of a module located in Southern Europe and North Africa with over 2,000 kWh/m². The typical module temperatures of 50 °C to 60 °C correspond to these locations as well.

Due to the changing cloudiness and rapidly varying irradiance frequently occurring in the south of Germany, a larger number of module temperature cycles, and thus more thermal-mechanical stress, is caused than would be the case in the Sahara or another southern location. Overall, owing to the higher load on the test modules due to the concentrating mirror, it is possible to test these modules on a Central European test field in less time in terms of stability and the identification of any weaknesses in the design and PV module semiconductors.



// 3X-Spiegelkonzentrator auf dem ZSW-Testfeld Widderstall.
// 3X concentrating mirror on ZSW's Widderstall testing facility.

ve ve ve op so

"Die Photovoltaik hat in Deutschland bereits einen Anteil von fast 7% am Nettostromverbrauch erreicht und ist weltweit auf dem Vormarsch. Wir testen Langzeitstabilität, optimieren Betriebsstrategien und sichern so ihren wirtschaftlichen Einsatz." "Today, photovoltaic technology contributes nearly 7% to the electricity consumption in Germany, and its worldwide future is looking bright. We test long-term stability and optimise operating strategies to secure their economically feasible application."

// Dr.-Ing. Jann Binder, Head of Department E-mail: jann.binder@zsw-bw.de, Phone: +49 (0) 711 78 70-209 // Peter Lechner E-mail: peter.lechner@zsw-bw.de Phone: +49 (0)711 78 70-254



#### // Durch Simulation des Modulverhaltens Leistungsverlusten vorbeugen

Die potenzialinduzierte Degradation (PID) kann bei PV-Modulen auftreten, wenn diese über längere Zeit bei feuchter Witterung im Feld einem hohen negativen Potenzial ausgesetzt sind. Unter diesen Bedingungen fließen messbare Leckströme vom Gestell über die Glasoberfläche zur Zelle. Ob eine Anlage Leistungsverlust durch PID entwickelt, hängt von der Empfindlichkeit der PV-Zelle, dem Standort der PV-Anlage und vom Wetter ab. Auch ist entscheidend, ob das PV-System floatend oder geerdet aufgebaut ist. Für Module aus kristallinem Silizium (c-Si) wird zudem eine temperaturbedingte Erholung der Leistung beobachtet, die der Degradation entgegenwirkt. Ein gutes Verständnis der Regeneration ist essenziell für die Sanierung eines PID-geschädigten PV-Parks. Mit den PID-Prüfungen gemäß dem Normenentwurf IEC 62804 kann zwar eine grundsätzliche Aussage über die PID-Anfälligkeit getroffen werden, allerdings wird nicht das Regenerationsverhalten adressiert.

Das ZSW-Testlabor Solab entwickelte deshalb eine Prüfmethode für eine Klimakammer mit künstlichem Sonnenlicht. Hierbei wird das PV-Modul, basierend auf Felddaten vom ZSW-Testfeld Widderstall, zyklisch belastet: auf Phasen mit Leckstrom und damit PID-Stress folgen Erholungsphasen mit Licht und hohen Modultemperaturen. Wird die Phasenlänge moduliert, lässt sich das PID-Verhalten des Moduls in einer anderen Klimazone simulieren. Die Abbildung unten zeigt den Verlauf der normierten Leistung eines PID-anfälligen c-Si-Moduls während eines zyklischen PID-Tests. Beim ersten Stresstest (moderates Klima) mit zweistündiger PID-Phase (bei 25 °C, 95 % rel. F., -1.000 V) gefolgt von einer zweistündigen Erholungsphase mit Sonnenlicht bleibt die Modulleistung stabil (dunkelblaue Kurve). Bei verschärfter Bedingung in Richtung tropisches Klima mit vierstündiger Stressphase degradiert das Modul schon nach wenigen Zyklen signifikant (hellblaue Kurve).

1200 1800 Test time [min.] - 2h\_PID/2h\_light - 4h\_PID/2h\_light

// Prevention of performance losses by simulating module

Potential-induced degradation (PID) may occur in PV modules given a prolonged exposure to a high negative potential in the field in wet weather. Under these conditions, measurable leakage currents flow from the rack to the glass surface and then to the cell. Whether or not a PV system will suffer performance losses due to PID depends on the sensitivity of the PV cell, the location of the PV system and the weather. Whether or not the PV system is floating or grounded is also decisive. Temperature-dependent performance recovery of c-Si modules can also be observed, which counteracts degradation. A good understanding of recovery is essential for the restoration of a PID-damaged solar farm. Although a general statement about PID susceptibility can be made with PID tests as per the draft standard IEC 62804, this regenerative behaviour is not addressed.

Therefore, the ZSW test laboratory Solab developed a test method for a climate chamber with artificial sunlight. Based on field data from the ZSW Widderstall testing facility, the PV module is charged cyclically: phases with leakage current and thus PID stress are followed by recovery periods with light and high module temperatures. If the phase length is modulated, the module's PID behaviour in a different climate zone can be simulated. The chart below shows the development of the normalised performance of a PID-susceptible c-Si module during a cyclic PID test. During the first stress test (moderate climate) with a two-hour PID phase (at 25 °C, 95% relative humidity and -1,000 V) followed by a twohour recovery period with sunlight, the module output remains stable (dark blue curve). Under harsher conditions leaning towards tropical climate with a four-hour stress phase, the module significantly degrades after only a few cycles (light blue line).

// PID-empfindliches c-Si-Modul im zyklischen PID-Stress/Regenerationstest. // Performance of a PID-susceptible c-Si module in a cyclic PID stress/recovery test.

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

#### // Optimierte Nutzung von erneuerbaren Energien in einem Wohngebiet

Mit steigender fluktuierender Energieerzeugung steigt der Bedarf an Zwischenspeicherung von elektrischer Energie. Eine Alternative zu großen Speichern stellt die aktive Nutzung der Speicherkapazitäten und variablen Lasten in Privathaushalten dar. Über ein Smart Grid können diese zu einem virtuellen Kraftwerk bzw. einer variablen Last zusammengeschlossen und von einer zentralen Leitwarte gesteuert werden. Eine Alternative zur Steuerung der Verbraucher durch die Leitwarte können Stromtarife sein, die dem Endverbraucher Anreize geben, sich der aktuellen Angebotslage beim regenerativen Strom anzupassen.

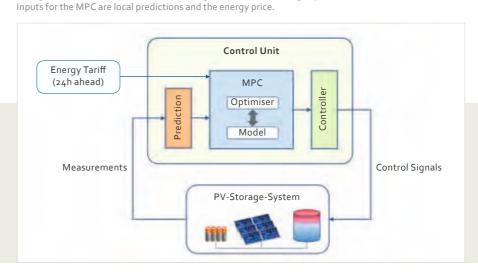
Angesichts der Vielzahl von Optionen und Zielgrößen ergibt sich die Frage nach der Optimierung des Betriebs von Erzeugern, Lasten und Speichern aus Sicht des Nutzers und des Energieversorgers bzw. Netzbetreibers. Am Beispiel eines Wohngebiets mit Wohnhäusern, die mit PV-Anlagen, Wärmepumpen, elektrischen und thermischen Speichern ausgestattet sind, kann gezeigt werden, dass der vom Nutzer gewünschte hohe Eigenverbrauchsanteil von lokal erzeugtem PV-Strom mit der dargebotsabhängigen Nutzung des Stroms aus Windkraft kombiniert werden kann. In der Simulation wurde dazu eine modellprädiktive Steuerung (MPC) entworfen, die aus der lokal verfügbaren Historie an Lastprofilen, Solarstrom und Stromtarifen eine Vorhersage zum optimierten Betrieb des Speichers und der Wärmepumpe berechnet (s. Grafik).

// Blockdiagramm der modellprädiktiven Steuerung für das PV-Speichersystem. Die Eingangsdaten für die Steuerung sind Vorhersagen und Energiepreise. // Diagram of the model predictive control algorithm for a PV storage system.

#### // Optimised use of renewable energy sources in residential areas

With the increasing generation of fluctuating energy, the demand for an intermediate storage of electricity rises as well. Active use of storage capacities and variable loads in private households are an alternative to large storage systems. Smart grids can combine these to form a virtual power plant or a variable load, controlled from a central control room. Electricity tariffs can be an alternative to controlling consumers via a control room and would give end users an incentive to comply with the current regenerative supply

Given the large number of options and variables, the question arises of how to optimise the operation of generators, loads and storage systems from the perspectives of the user, the utility and the grid operator, respectively. Using the example of a residential area with houses equipped with PV systems, heat pumps, electrical and thermal storage systems, it can be shown that the high proportion of self-consumption of locally generated PV electricity as desired by the user can be combined with a supply-dependent use of electricity from wind power. In the simulation, a model predictive control (MPC) was designed that uses the locally available history of load profiles, solar power and electricity tariffs to calculate a prediction of an optimised operation of storage systems and heat pumps (see the chart).



// Dr. Jann Binder E-mail: jann.binder@zsw-bw.de

Phone: +49(0)7117870-209

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

#### // Unsere Kernkompetenzen

Die Motivation zur Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Brennund Kraftstoffe besteht einerseits darin, erneuerbare Energien effizient in einen leicht transportablen, "tankbaren" chemischen Energieträger zu überführen und zu speichern, und zum anderen 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 insbesondere die Kostenreduktion der gesamten Wasserstofferzeugungsanlage 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 Kraftstofferzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz.

Zu unseren Arbeitsschwerpunkten zählen Power-to-Gas (P2G®), Elektrolyse, die thermochemische Konversion biogener Ressourcen sowie die Brennstoffreformierung bzw. -konditionierung.

#### // 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 on a technical scale of several hundred kW. Our activities are focused on 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 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 and conditioning.

#### // Alkalische Druckelektrolyse für P2G®-Anwendungen

// Alkalische Druckelektrolyse

für P2G®-Anwendungen

applications

Alkaline pressure electrolysis for P2G®

Seit 2013 arbeitet das Fachgebiet REG an der Entwicklung einer innovativen alkalischen Druckelektrolyse (AEL) für Power-to-Gas (P2G®)-Anwendungen im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekts "P2G®-Elektrolyse". Auf dem Weg zur Errichtung einer Demonstrationsanlage konnten 2014 u. a. folgende Meilensteine erreicht

- > Abschluss des Detail-Engineerings und der HAZOP(HAZard and OPerability)-Analyse für ein 1-MW<sub>el</sub>-AEL-Kernsystem.
- > Prototypenbau des neu entwickelten ZSW-Zellrahmendesigns inklusive Festigkeits- und Performance-Untersuchung.
- > Konzeptstudien und Erprobung eines innovativen Elektrodenverbundes zur Minimierung elektrischer Verluste und der Fertigungskosten und mit hoher Adaptionsfähigkeit auf diverse Zellrahmenkonzepte in Null-Abstands-Konfiguration.
- > Konzeptfinalisierung der sicherheitsgerichteten Produktgas-Überwachung.
- > Engineering der Elektrotechnik (MSR) und Steuerungsarchitektur.
- > Inbetriebnahme eines Systemprüfstandes (s. Grafik unten) zur Untersuchung von Systemmodulen, Einzelkomponenten und Kurzblöcken im dynamischen alkalischen Druckbetrieb und unter Realbedingungen, wie z.B.
- Zellrahmen- und AEL-Block-Konzepte,
- Steuer- und Regelstrategien im intermittierenden Betrieb,
- Performance-Analysen von Elektroden und Membranen,
- Verhalten und Anpassungen von Mess- und Regelungs-
- Qualifizierung und Validierung von Elektrolyse-Kurzblöcken in Form von Messdienstleistungen für Projektpartner, mittelfristig auch als Dienstleistung für interessierte externe Firmen.

#### // Alkaline pressure electrolysis for P2G® applications

Since 2013, the REG department has been working on the development of an innovative alkaline pressure electrolyser (AEL) for power-to-gas (P2G®) as part of the joint project "P2G®-electrolysis" sponsored by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). In 2014, the following milestones were reached along the way of building a demonstration plant:

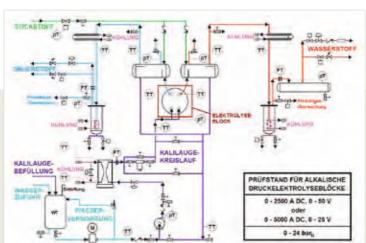
- > Completion of detailed engineering and HAZOP (HAZard and OPerability) analysis for a 1-MW<sub>al</sub> AEL core system.
- > Prototype construction of the newly developed ZSW cell frame design incl. solidity and performance analysis.
- > Concept studies and testing of an innovative electrode assembly to minimise electrical losses and production costs and include high adaptability to various cell frame concepts in zero-gap configurations.
- > Concept finalisation of safety-oriented product gas monitoring.
- > Electrical engineering (E/I&C engineering) and control architecture.
- > Commissioning of a system test bench for the examination of system modules (see chart below), individual components and short blocks in dynamic alkaline pressure operation and under real conditions, for example
- Cell frame and AEL block concepts,
- Control strategies for intermittent operation,
- Performance analyses of electrodes and membranes,
- Behaviour and adjustments of measurement and control instruments,
- Qualification and validation of electrolysis short blocks in the form of measurement services for project partners and as a service for interested companies in the medium term.



"Ohne regenerative, strombasierte Kraftstoffe (eFuels) wird die Energiewende nicht gelingen."

"The energy transition will not succeed without renewable eFuels."

// Dr. Michael Specht, Head of Department E-mail: michael.specht@zsw-bw.de, Phone: +49(0)7117870-218



// Vereinfachtes Blockschaltbild des alkalischen Druckelektrolyseprüfstandes.

// Simplified block diagram of the alkaline pressure electrolysis test bench.

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



#### // FlexFuel-Brennstoffzellensystem zur netzautarken Strom- und Wärmeversorgung

Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projektes in Zusammenarbeit mit einem mittelständischen Unternehmen aus Baden-Württemberg ist die Entwicklung eines PEM-Brennstoffzellensystems zur netzautarken Stromversorgung mit den nicht leitungsgebundenen Energieträgern Flüssiggas bzw. Bioethanol im Leistungsbereich 1 kW<sub>el</sub>. Für derartige Systeme finden sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen netzferne Stromversorgung, Bordstromversorgung und Range Extender für Batteriefahrzeuge bis hin zur Hausenergieversorgung (Insellösungen). Das wesentliche Alleinstellungsmerkmal der Entwicklung ist neben dem flexiblen Kraftstoffeinsatz insbesondere der geschlossene Wasserkreislauf. Das im Gasprozessor für die Dampfreformierung benötigte Wasser wird vollständig aus dem Prozess zurückgewonnen, sodass kein externes Wasser zugeführt werden muss. Das System ist so konzipiert, dass anfallende Prozesswärme in einem Heizkreis genutzt werden kann oder über Radiatoren an die Umgebung abgeführt wird, falls keine Wärmesenke vorhanden ist. Die elektrische Schnittstelle ist zur Ladung verschiedener Batterietypen (Lithium-Ionen, Blei, Nickel-Metallhydrid) auf unterschiedlichen Spannungsniveaus (24 V/48 V) konzipiert. Das Brennstoffzellensystem ist hinsichtlich Aufbau und Automatisierungsgrad bereits ein produktnaher Prototyp und wiegt bei Abmessungen von ca. 99 x 62 x 35 cm (HxBxT) etwa 80 kg.

Seit Sommer 2014 befindet sich das System in der Erprobung. Im Rahmen des praxisnahen Versuchsbetriebes konnten alle wesentlichen Systemspezifikationen nachgewiesen werden.



# // FlexFuel fuel cell system for grid-independent electricity and heat supply

The aim of the project, sponsored by German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and carried out in cooperation with a medium-sized enterprise from Baden-Württemberg, is the development of a PEM fuel cell system for grid-independent power supply with the fuels LPG and bio-ethanol, both not pipeline-bound, in the power range of 1 kW<sub>el</sub>. For such systems, there is a variety of applications in the areas of grid-remote power supply, on-board power supply, and range extenders for battery-powered vehicles through to domestic energy supply (stand-alone solutions). The unique selling point of the development is, in addition to the flexible use of fuels, the closed water circuit. The water required in the gas processor for steam reforming is fully recovered from the process, so no external water needs to be supplied. The system is designed in such a way that process heat can be utilised in a heating circuit or radiated into the environment via radiators if no heat sink is available. The electrical interface is suitable for charging different types of batteries (Li-ion, lead and nickel-metal hydride) at different voltage levels (24 V / 48 V). The fuel cell system prototype is already close to the final product in terms of structure and level of automation and weighs about 80 kg while measuring approximately 99 x 62 x

The system has been undergoing tests since 2014. All essential system specifications have been successfully demonstrated in practical test operation.

#### // Mit Bioethanol bzw. Flüssiggas betriebenes FlexFuel-Brennstoffzellensystem des ZSW in der Leistungsklasse 1 kW<sub>el</sub>.

// ZSW FlexFuel fuel cell system powered with bio-ethanol and LPG in the 1-kW $_{\rm el}$  power range

// Dr. Marc-Simon Löffler E-mail: marc-simon.loeffler@zsw-bw.de Phone: +49(0)7117870-233

#### // WOMBAT Power-to-Gas (P2G®)

Im Jahr 2014 nahm die erste kommerzielle 6-MW-P2G-Anlage im emsländischen Werlte ihren Betrieb auf. Ein Automobilkonzern produziert dort aus erneuerbarem Strom für die H2-Produktion und CO<sub>2</sub> aus der vorhandenen Biogasanlage sogenanntes e-gas für die CO<sub>2</sub>-neutrale Mobilität seiner Kunden mit CNG-Fahrzeugen. Die Anlage verfügt über ein komplexes Wärmemanagement-System, das es ermöglicht, mit Abwärme aus der Elektrolyse und der Methanisierung die unterschiedlichen Wärmeverbraucher der Biogasanlage zu versorgen. Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung aus dem Biogas erfolgt mittels Aminwäsche, wobei die Regeneration der CO<sub>2</sub>-beladenen Aminlösung thermisch erfolgt. Da die P2G-Anlage im Gegensatz zur Biogasanlage nicht stationär, sondern anhand des Stromangebots betrieben wird, stellt das Wärmemanagement eine große Herausforderung dar. Die im vom Bundeswirtschaftsministerium (BMWi) geförderten Verbundprojekt WOMBAT erstellte Simulation der Gesamtanlage sowie das Monitoring-System mit Datenerfassung, Speicherung und Auswertung liefern die nötigen Werkzeuge für die Beurteilung und Optimierung des Anlagenbetriebs.

#### // Weitere Entwicklung des P2G®-Verfahrens am ZSW

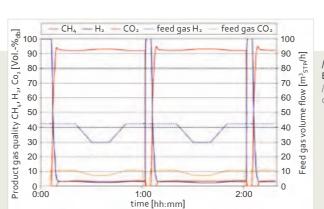
In einem zukünftigen, weitgehend regenerativ basierten Energiesystem wird eine installierte P2G-Leistung in einer Größenordnung von 8–16 GW benötigt. Jetzt geht es darum, die Technologie hinsichtlich Performance und Kosten für den Markteintritt fit zu machen. Seit Oktober 2014 geht es im BMWi-geförderten Projekt PtG 250-II vor allem um die Automatisierung der ZSWeigenen 250-kW<sub>el</sub>-P2G-Anlage. Dazu werden wirtschaftlich darstellbare Einsatzfahrpläne mittels Strompreissimulation in Zukunftsszenarien mit einem steigenden Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz generiert und mit der Anlage abgefahren. Außerdem soll eine kostengünstige, vereinfachte Gaseinspeisung für dezentrale P2G-Anlagen konzipiert werden – ein weiterer Faktor für einen wirtschaftlichen P2G-Betrieb.

#### // WOMBAT power-to-gas (P2G®)

In 2014, the first commercial 6-MW-P2G plant started its operation in Werlte, Emsland. An automobile company uses renewable energy for the production of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> from the existing biogas plant to produce so-called e-gas for CO<sub>2</sub>-neutral mobility of their customers with CNG vehicles. The plant features a complex thermal management system that makes it possible to supply the various heat consumers in the biogas plant with waste heat recovered from electrolysis and methanation. Separating CO<sub>2</sub> from biogas is achieved through amine gas treating, whereas the regeneration of the CO<sub>2</sub>-laden amine solution takes place thermally. Thermal management makes for a major challenge since the P2G plant, in contrast to the biogas plant, is not operated on a stationary basis but on the basis of the current energy supply situation. The WOMBAT simulation, created as part of the joint project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), which simulates the monitoring system with data collection, storage and evaluation, provides the necessary tools for assessing and optimising plant operation.

#### // Further development of the P2G® process at ZSW

In a future, largely renewable-based energy supply system, an installed P2G capacity in the range of 8-16 GW will be required. The issue currently at hand is getting the technology ready for the market in terms of performance and costs. Since October 2014, the BMWi-funded project PtG 250-II has mostly worked on the automation of ZSW's own 250-kW<sub>el</sub> P2G system. To this end, financially viable operating schedules are generated based on electricity price simulations in future scenarios with a rising share of renewables in the power grid and are tested accordingly in the plant. In addition, a low-cost, simplified gas supply for decentralised P2G systems is to be designed – another key factor of economic P2G operation.



// Eduktgasdosierung und Produktgasqualität bei dynamischem Betrieb der ZSW-eigenen 250-kW<sub>el</sub>-P2G-Anlage.

// Reactant gas dosing and product gas quality during dynamic operation of ZSW's own 250-kW  $_{\rm el}$  P2G plant.

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

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



#### // Unsere Kernkompetenzen

#### Neue Aktivmaterialien

Der traditionelle Schwerpunkt der Arbeiten liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren mit der Kernkompetenz Entwicklung maßgeschneiderter Pulver. 25 Jahre Materialforschung bilden die Basis für unser umfangreiches Verständnis über die Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktionsund Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien (wie z. B. Hochvoltspinellen, Lithiumübergangsmetallphosphaten und -silikaten) und Anodenmaterialien (z. B. optimierten Kohlenstoffmodifikationen, Titanaten und Legierungsanoden) für Lithiumlonen-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 Zellen im Format 18650 und gestapelte Pouchzellen für Forschungszwecke hergestellt. Hier können angepasste vorindustrielle Prozessentwicklungen für neuartige, leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Zellgenerationen generiert werden. Im eLaB gefertigte Zellen mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und eine Zyklenstabilität > 15.000 Zyklen. Ein Fokus liegt derzeit auf der Prozessierung von Hochenergieelektroden mit wässrigen Bindersystemen und auf der Entwicklung von Zellen mit Hochvoltspinellen.

#### 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.

// Our main focus

#### New active materials

Our work traditionally focuses on synthesising and characterising functional materials for batteries and supercapacitors with the core expertise on the development of tailor-made powders. 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 functional and processing properties, on the other. In addition to new cathode materials (such as high-voltage spinels, lithium transition metal phosphates and silicates) and 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

Cells in the 18650 format and stacked pouch cells are produced at the ZSW Laboratory for Battery Technology (eLaB) for research purposes. The laboratory enables us to produce adapted pre-industrial process developments to create new, more powerful components for future cell generations. Cells produced in the eLaB with self-developed electrodes exhibit a very high reproducibility and a cycling stability of >15,000 cycles. A current focus is on processing high-energy electrodes with aqueous binder systems and developing cells with high-voltage spinels.

#### Post-mortem analyses

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

#### // Neue Materialien für langlebige Fahrzeugbatterien

Seit September 2013 arbeitet das ZSW zusammen mit 16 weiteren Projektpartnern an dem von der EU-Kommission geförderten Projekt MAT4BAT. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Batterien für Automotive-Anwendungen mit hoher Energiedichte (>250 Wh/kg) und einer Lebensdauer von über 4.000 Lade-/Entladezyklen.

Das MAT4BAT-Projekt verfolgt einen ergebnisorientierten Ansatz, in dem drei Zellgenerationen entwickelt werden. Als erste Generation dienten 100 kommerzielle Zellen mit NMC/Carbonat-Elektrolyt/Grafit, deren kritische Betriebsparameter bezüglich ihres Einflusses auf die Lebensdauer untersucht wurden. Die Untersuchung der Alterungsmechanismen mittels Post-Mortem-Analysen der jeweils vorherigen Generation führte zu Materialverbesserungen in Prototypen (10-40-Ah-Zellen).

Das ZSW nimmt im Projekt eine führende Rolle bei der Post-Mortem-Analyse von gealterten Batterien ein und ist u. a. an der Evaluierung von neuen Materialien beteiligt. Des Weiteren wird eine neue Methode zur chemischen Tiefenprofilanalyse von Elektroden entwickelt.

#### // New materials for long-life automotive batteries

Since September 2013, ZSW has been working together with 16 international partners on the MAT4BAT project funded by the European Commission. The aim of the research is the development of batteries for automotive applications with a high energy density (>250 Wh/kg) and a lifetime of more than 4,000 cycles.

The project follows a results-based strategy, in which three cell generations are developed. As a first generation, 100 commercial cells with NMC/liquid carbonate electrolyte/graphite materials were tested for the operating parameters critical for ageing. Material improvements in prototypes (10-40-Ah cells) were achieved by investigating the ageing processes via post-mortem analyses of the previous cell generation.

In the project, ZSW plays a leading role in post-mortem analyses of aged batteries and is, among other things, involved in the evaluation of new materials. Furthermore, a novel method for chemical depth profiling of electrodes is under development.



// Das ZSW hat Erfahrung mit über 600 Zellöffnungen und nimmt auch im Projekt wesentliche Aufgaben der Post-Mortem-Analysen wahr.
// ZSW has opened more than 600 cells so far, and in the project it plays a leading role in post-mortem analyses.



More information: www.mat4bat.eu

"E-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."

"e-Mobility and renewable energies require new energy storage systems. We provide the complete value chain from the powder to the finished cell. In doing so, we are able to make an important contribution."

// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens, Head of Department E-mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de, Phone:+49(0)731 95 30-612 // Dr. Thomas Waldmann E-mail: thomas.waldmann@zsw-bw.de Phone: +49(0)731 95 30-212



#### // Vom Material bis zur Betriebsstrategie – Projekt Li-EcoSafe

Innerhalb des vom ZSW koordinierten Verbundprojekts "Li-Eco-Safe" arbeiten Wissenschaftler des ZSW, des DLR, des HIU und mehrerer Institute der Universität Ulm an der Entwicklung neuer Zellkonzepte, damit Lithium-Ionen-Batterien leistungsstärker, sicherer und kostengünstiger werden. Hauptziel des Vorhabens ist die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien entlang der kompletten Entwicklungslinie vom Material bis hin zur Betriebsstrategie (s. Abb. unten). Dabei werden am ZSW die folgenden Forschungsansätze verfolgt:

- > Ersatz von Nickel/Kobalt-basierten Schichtoxiden durch überladesicherere und verfügbarere Kathodenmaterialien.
- > Evaluierung von organischen Materialien als Elektrodenmaterial, Binder und Stromableiter als metall- und schwermetallfreie Alternativen zu heutigen Materialien.
- > Ersatz von synthetischen Grafiten durch kostengünstige Grafit-Abfallprodukte und Kohlenstoffkomposite.
- > Optimierung der Stabilität der Grenzflächen durch Oberflächenmodifizierung, Elektrolytadditive und/ oder thermisch resistente Beschichtungen.
- > Erarbeitung von Methoden zur Sicherheitsabschätzung von Komponenten und Zellen.

Die Komplexität der Fragestellungen erfordert eine koordinierte multidisziplinäre Herangehensweise, die durch die enge Kooperation von Forschern aus Chemie, Elektrochemie, Materialwissenschaft, Theorie und Systemtechnik gewährleistet wird.

## // From the material to the operating strategy – Project Li-EcoSafe

As part of the joint project "Li-EcoSafe", coordinated by ZSW, scientists from ZSW, DLR, HIU and several institutes of the University of Ulm are working on the development of new cell concepts to make lithium-ion batteries more efficient, safer and cheaper. The main goal 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 (see the fig. below). The following research approaches are being pursued by ZSW:

- > Replacement of nickel/cobalt-based layered oxides by more available cathode materials that offer overcharge safety.
- > Evaluation of the suitability of organic materials as electrode materials, binders and conductors as metal- and heavy-metal-free alternatives to today's materials.
- > Replacement of synthetic graphites by inexpensive graphite waste products and carbon composites.
- > Optimisation of the stability of the interfaces by way of surface modification, electrolyte additives and/or thermally resistant coatings.
- > Development of methods to assess the safety of components and cells.

The complexity of the issues requires a coordinated, multidisciplinary approach that is ensured through close cooperation between researchers from the chemical, electrochemical, material science, theoretical and system engineering fields.

# Co/Ni-free cathode materials Stable boundary layers Material characterisation Safety and operating strategies Modelling Material evaluation in full cells

// Hauptziel von Li-EcoSafe sind neue Zellkonzepte für zuverlässigere, sicherere und kostengünstigere Lithium-Ionen-Batterien – vom Material zur Betriebsstrategie.

// The main goal of Li-EcoSafe are new cell concepts for safer, more efficient, and cheaper lithium-ion batteries – from the material to the operating strategy.

// More information: li-ecosafe.zsw-bw.de

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

#### // Neue Elektroden-Design-Konzepte für Batterie-Superkondensator-Hybride (NovaCap)

In der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Nachwuchsgruppe NovaCap werden neue Konzepte und Materialien für Hochleistungsspeicher erforscht und entwickelt. Dazu wird der Ansatz verfolgt, innovative nanostrukturierte Lithium-Insertionsverbindungen mit hochporösen Kohlenstoffmaterialien zu kombinieren. Ziel ist es, daraus Elektroden und Zellen mit gleichzeitig hoher Energiedichte und hoher Strombelastbarkeit zu entwickeln. Die wesentlichen Arbeiten umfassen:

- > Screening geeigneter Kathoden- und Anodenmaterialien.
- > Entwicklung leistungsfähiger Komposite mit hochporösen Kohlenstoffmaterialien unter Berücksichtigung der Verarbeitungseigenschaften.
- > Entwicklung und Optimierung entsprechender Elektroden für die Anwendung als Hybridkondensator.
- > Anpassung der Elektrolytchemie und Zellbalancierung.
- > Validierung gegen kommerziell verfügbare Superkondensatoren und Lithium-Ionen-Batterien.

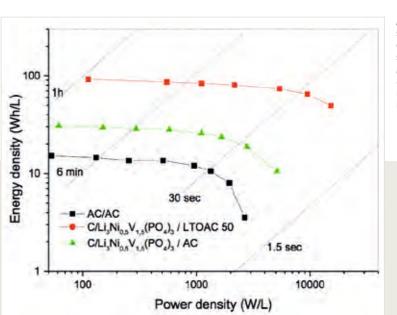
Es wurde erfolgreich eine neue Materialklasse von Hochleistungs-Lithium-Insertionsverbindungen identifiziert (s. Grafik unten). In Kombination mit der Weiterentwicklung des Elektrodendesigns und der Zellauslegung konnten sowohl Leistung als auch Energiedichte gegenüber kommerziell verfügbaren Superkondensatorelektroden signifikant verbessert werden.

# // New electrode design concepts for hybrid battery supercapacitors (NovaCap)

The junior research group NovaCap, funded by German Ministry of Education and Research, is researching and developing new materials and concepts for high-performance storage systems. For this purpose, the approach is to combine innovative nanostructured lithium insertion compounds with highly porous carbon materials. The aim is to use this to develop electrodes and cells with both high energy density and high current rate capability. The main work includes:

- > Screening of suitable cathode and anode materials.
- > Development of effective composites with highly porous carbon materials taking into account the processing properties.
- > Development and optimisation of corresponding electrodes for use as hybrid capacitors.
- $\,>\,$  Adaptation of the electrolyte chemistry and cell balancing.
- > Validation against commercially available supercapacitors and lithium-ion batteries.

A new class of materials of high-capacity lithium insertion compounds has been successfully identified (see the chart). Combined with the further development of the electrode and the cell design, both power and energy density were significantly improved compared to commercially available supercapacitor electrodes.



// Ragone-Diagramm verschiedener Elektrodenkombinationen: symmetrische Aktivkohlenstoffelektroden (schwarz); neu entwickeltes Kathodenmaterial kombiniert mit einer Aktivkohlenstoffelektrode (grün); innovative Anode und Kathode (rot). // Ragone chart of various electrode combinations: symmetric activated carbon electrodes (black); newly developed cathode material combined with an activated carbon electrode (green); innovative anode and cathode (red).

// Dr. Sonia Dsoke E-mail: sonia.dsoke@zsw-bw.de Phone: +49(0)7319530-560

# // Produktionsforschung (ECP) Production Research (ECP)



#### // Unsere Kernkompetenzen

Das Jahr 2014 war geprägt vom Aufbau und der Inbetriebnahme der Forschungsplattform für die Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL). Nach weniger als 24 Monaten Planungs- und Implementierungszeit wurde die FPL im September unter großer öffentlicher Aufmerksamkeit durch die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Prof. Wanka, eingeweiht. Die Inbetriebnahme aller Produktionsanlagen der FPL wurde dann bis Dezember abgeschlossen. Das gesamte an diesem Projekt beteiligte Team des ZSW konnte damit ein sehr komplexes Vorhaben in einer auch nach industriellen Maßstäben sehr kurzen Zeit umsetzen und so die Erwartungen aus Industrie und Politik voll erfüllen. Damit wurde ein wichtiger Schritt getan, um eines der strategischen Ziele der Bundesregierung – die Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen in Deutschland – der Umsetzung näher zu bringen.

Schon während des Jahres erweiterte sich das Aufgabenspektrum des Expertenteams deutlich über die anlagenbezogenen Themen hinaus. Zum einen wurden seit dem Frühjahr im Zuge von Vor- und Endabnahmen der Produktionsanlagen auch bereits umfangreiche Prozesserfahrungen für alle Schritte des Produktionsprozesses gesammelt, die teilweise schon wieder in zusätzliche Maschinenoptimierungen eingeflossen sind. Zum anderen wurde zusammen mit Entwicklungspartnern aus der Industrie im Rahmen des PHEV-1-Standards ein eigenes Zelldesign und ein dazu passendes Gehäuse entwickelt, das nun die Plattform für die ersten "serienmäßig" auf der FPL hergestellten Zellen bilden wird. Damit kann das ZSW seine Position als starker Partner für die Batterieforschung weiter ausbauen.

Das Team von ECP wird 2015 daran arbeiten, in den ersten gemeinsamen Projekten während der Nutzungsphase den Anspruch an die FPL zu erfüllen und die Anlagen zu einer seriennahen Testumgebung mit reproduzierbaren Produktionsprozessen zu entwickeln.

#### // Our main focus

2014 was marked by the construction and commissioning of the Research Platform for the Production of large Lithium-ion Cells (FPL). After less than 24 months of planning and construction time, the research platform was inaugurated by the Federal Minister of Education and Research, Prof. Wanka, in September, drawing a great deal of public attention. The commissioning of all FPL production facilities was completed by December. The entire ZSW team involved in this project was able to complete a very complex undertaking in a short time frame, even compared with industry benchmarks, thereby fully meeting the expectations of the industry and the government. An important step was made towards realizing one of the strategic goals of the federal government: the production of lithium-ion cells in Germany.

As the year progressed, the specialist team's range of tasks extended well beyond plant-related issues. Since spring, extensive process experience has been gained from all steps of the production process in the course of pre- and final commissioning of the production facilities, which has partially been put to use in further machine optimisations. In collaboration with development partners from the industry, and based on the PHEV-1 standard, we developed our own cell design and a matching housing, which will now form the platform for the first cells produced "serially" in FPL. This allows ZSW to further consolidate its position as a strong partner for battery research.

In 2015, the ECP team will work to meet the demands placed on FPL in the first joint projects during the utilisation phase and to evolve the facilities into a near-series test environment with reproducible production processes.

# // Industrielle Forschungsplattform für die Produktion großer Lithium-Ionen-Zellen

Aufbau und Inbetriebnahme der FPL-Anlagen waren das herausragende Projekt im Jahr 2014; es konnte termin- und budgetgerecht fertiggestellt und sogar kurzfristig im September noch um zusätzliche Anlagen für Verwiegung und Mischen ergänzt werden. Die neuen Anlagen erlauben eine Fertigung von einigen hundert Zellen pro Tag mit reproduzierbarer, hoher Qualität. Der modulare Aufbau der Produktionsanlagen bietet Unternehmen und Forschungseinrichtungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette die Möglichkeit, neue Verfahren und Anlagenkomponenten in einer prozesssicheren Testumgebung zu erproben.

Die Forschungsplattform umfasst alles, was für die seriennahe Herstellung auch automobiltauglicher Zellen benötigt wird: eine temperierbare 60-Liter-Mischanlage zur Herstellung der Elektrodenpasten, eine doppelstöckige Elektrodenbeschichtungsanlage zur beidseitigen Beschichtung mit 500 mm Beschichtungsbreite sowie einen Präzisionskalander für die Verdichtung der Elektroden. Die voll automatisierte Zellassemblierung in einem 200 m² großen Trockenraum und die daran anschließende Befüll- und Aktivierungsanlage sind ausgelegt auf eine Taktzeit von einer Zelle pro Minute. Zur ebenfalls vollautomatischen Zellformierung steht auf 70 m² Fläche ein sauerstoffreduzierter Raum mit 240 temperierbaren Zyklisierplätzen sowie 2.016 Lagerplätzen zur Verfügung.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat die Anlagenausrüstung mit 25,7 Mio. Euro gefördert. Die Gebäudeerweiterung erfolgte mit einem Zuschuss des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg in Höhe von 6 Mio. Euro.

# // Industrial Research Platform for the Production of large Lithium-ion Cells

The construction and commissioning of the FPL facilities was the most prominent project in 2014; it was completed on schedule and within the budget and was even complemented with additional weigh stations and mixing machines at short notice in September. The new facilities allow for the production of several hundred cells per day with a reproducible, high level of quality. The modular structure of the production facilities enables companies and research organisations to test new processes and system components along the entire value chain in a reliable test environment.

The research platform includes everything that is required for near-series manufacture, also of automotive cells: a temperature-controlled 60-litre mixing station for preparing electrode slurrries, a two-storey electrode coating line for double-sided coating at a coating width of 500 mm and a precision calender to compress the electrodes. The fully automated cell assembly in a 200 m² drying room and the adjacent filling and activation system are designed for a cycle time of one cell per minute. For fully automated cell formation, there is a 70-square-metre low-oxygen room with 240 temperature-controlled stations for cyclisation, and 2,016 storage stations.

The facility received 25.7 million euros from the German Federal Ministry of Education and Research for equipment purchases. The building extension has been made possible by a grant to the amount of six million euros from the Ministry of Finance and Economics of the State of Baden-Württemberg.



Computertomograph zur Qualitätskontrolle dreidimensional visualisiert werden.

// Structures and anomalies within the cell can be visualised three-dimensionally with a computer tomograph for quality control.



"Mit der Forschungsplattform überbrücken wir die Lücke zwischen Fertigung im Pilotmaßstab und industrieller Großserienfertigung von großformatigen Lithium-Ionen-Zellen." "With this research platform, we bridge the gap between pilot scale production and the industrial mass production of large format lithium-ion cells."

// Wolfgang Brugger, Head of Department E-mail: wolfgang.brugger@zsw-bw.de, Phone: +49 (0) 731 95 30-344



// Rainer Stern E-mail: rainer.stern@zsw-bw.de Phone: +49(0)731 95 30-345

# // 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 Batteriemanagements 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 Batteriemanagementsystemen (BMS) forschen wir an modellbasierten Algorithmen zur Zustandsbestimmung (Ladezustand und Alterung), zur Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit, zur optimalen Laderegelung und zum Energiemanagement. Ziel ist ein dynamischer, zuverlässiger und wirtschaftlicher Betrieb des Speichers in den genannten Anwendungen.

#### // 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 and investigating their behaviour with regard to operating failures and accident situations as well as developing battery management methods. The batteries' applications include stationary energy storage in electric grids and in portable devices as well as in electrified drive trains for electromobility.

#### 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 heavily damaged accumulators and their resistance to various abuse conditions and operating failures.

#### 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 a dynamic, reliable and efficient operation of the storage system in the applications mentioned.

## // Entwicklung von Algorithmen, Software und Elektronik für Batteriemanagementsysteme

Zentrale Aufgabe der Batteriesystemtechnik ist die Entwicklung von Algorithmen, Software und Elektronik für Batteriemanagementsysteme (BMS) zur Überwachung und Steuerung der elektrochemischen Speicher. Unter der Konsortialführung eines Industrieunternehmens arbeitet das Fachgebiet zusammen mit weiteren Partnern aus Industrie und Forschung in dem vom Bundesforschungsministerium (BMBF) geförderten Projekt "Integrierte Komponenten und integrierter Entwurf energieeffizienter Batteriesysteme (IKEBA)" mit.

Die Zielstellungen, die das Konsortium verfolgt, umfassen die softwarebasierte Entwicklung einer neuen BMS-Architektur sowie die Bereitstellung integrierter softwarebasierter Verfahren für den Entwurf dieser Systeme und Schaltungen. Das Anforderungsmanagement und die modellbasierte Architektur für das BMS werden mittels UML-Modellierung in der Softwareumgebung Enterprise Architect dargestellt. Die Modellierung und Simulation des komplexen heterogenen Systems bestehend aus Batteriemodell, Elektronikbauteilen, Schaltungen, Ablaufsteuerung, Kommunikationskanälen und BMS-Software erfolgen in der auf SystemC basierenden Entwurfsumgebung COSIDE®, die das Erstellen und Evaluieren virtueller Prototypen ermöglicht. Neben der Formulierung von Anforderungen und Batteriespezifikationen (s. Abb.) arbeitet das ZSW an der Simulation von Testfällen (use cases), um zu überprüfen, ob die definierten Anforderungen, Spezifikation und Zielstellungen vom entwickelten Prototypen erfüllt werden. Zu den definierten Testfällen gehören Zellmonitoring, Symmetrierverfahren (Balancing), Zustandsschätzung, Leistungs- und Energieprognose, Laderegler, Fehlerdetektion und Diagnose.

# // Development of algorithms, software and electronics for battery management systems

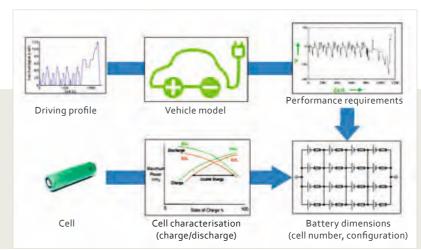
The central objective of battery system engineering is the development of algorithms, software and electronics for battery management systems (BMS) to monitor and control electrochemical storage systems. Managed by an industrial enterprise, the research department cooperates with partners from industry and research in the project "Integrierte Komponenten und integrierter Entwurf energieeffizienter Batteriesysteme (IKEBA)" (Integrated components and integrated design of energy-efficient battery systems) funded by the German Federal Ministry for Education and Research (BMBF).

The objectives pursued by the consortium include developing a software-based new BMS architecture and providing integrated software-based methods to design these systems and circuits. Requirements management and model-based architecture for the BMS are represented with UML modelling in the Enterprise Architect environment. Modelling and simulation of a complex heterogeneous system comprising a battery model, electronic components, circuits, process controls, communication channels and BMS software take place in the SystemC-based design environment, COSIDE®, which allows for the creation and evaluation of virtual prototypes. In addition to formulating requirements and battery specifications (see the figure), ZSW is working on the simulation of use cases to check whether the defined requirements, specification and objectives are met by the prototype developed. The defined use cases include cell monitoring, balancing, state estimation, performance and energy forecast, charge controllers, fault detection and diagnosis.



"Im eLaB erforschen, testen und untersuchen wir Batterien und Systeme flexibel, normgerecht und innovativ." "In the eLaB, we research, test, and analyse batteries and systems in flexible, standards compliant and innovative ways."

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



// Modell- und testbasierte Batteriespezifikation. // Model and use case-based battery specifications

// More information: www.kit.edu/ikeba

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

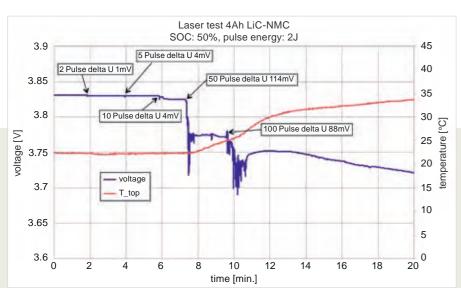


#### // Kurzschluss mittels Laserbeschuss

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. Problematisch für Lithium-Batterien ist der interne Kurzschluss, der in seiner Tragweite vom kaum messbaren Spannungsflackern bis hin zum thermischen Durchgehen (thermal runaway) und damit zur Zellzerstörung führt. Verschiedene Testmethoden zur Simulation des internen Kurzschlusses, wie Nagelpenetration, "blunt rod intrusion", Einbringen von Partikeln etc. wurden vorgeschlagen und fanden auch in Testprozeduren ihren Niederschlag. Diese Testmethoden sind allerdings nach wie vor unbefriedigend, da sie nur sehr bedingt den Zustand des internen Kurzschlusses nachbilden.

Deshalb wurde untersucht, ob sich die Nachbildung des internen Kurzschlusses mittels Laserbeschuss realisieren lässt. Damit konnte gezeigt werden, dass sich durch Variation der Laserparameter Kurzschlüsse unterschiedlicher Intensität simulieren lassen (s. Grafik unten). Zylindrische Löcher werden in die Elektrodenlagen gebrannt (s. Abb. oben) und simulieren durch die Energiefreisetzung ähnliche Verhältnisse, wie sie auch im Ergebnis des internen Kurzschlusses auftreten. Die dabei frei werdende thermische Energie kann ausreichen, um einen Lawineneffekt auszulösen und damit das thermische Durchgehen der Zelle zu bewirken.

Die Ergebnisse werden veröffentlicht und der Fachwelt zur Diskussion gestellt. Bei entsprechender Resonanz könnte diese Methode nach weiterer Bearbeitung ggf. in eine neue Testprozedur für die Simulation des internen Kurzschlusses in Lithium-Zellen münden.



// CT-Aufnahme einer Lithium-Zelle nach 50 Pulsen Laserbeschuss, Loch mit 0,72 mm Ø, 9 Lagen penetriert.

// CT scan of a lithium cell after 50 laser pulses, hole Ø 0.72 mm, 9 layers penetrated.

#### // Laser-induced short circuit

The realisation of efficient mobility based on electric and hybrid vehicles and the stationary intermediate storage of electrical energy from renewable energy sources require a steady increase in the power and energy density of batteries. A dreaded failure of lithium-batteries is the internal short circuit, which can lead to barely measurable voltage flicker through to thermal runaway and thus to cell destruction. Various test methods for simulating the internal short circuit have been proposed and found expression in test procedures, such as nail penetration, blunt rod intrusion, the introduction of particles, etc. These test methods are still unsatisfactory because they only partly represent the state of an internal short circuit. Whether or not it is possible to represent an internal short circuit by means of laser pulse impact was examined.

It was demonstrated that it is indeed possible to create short circuits of varying intensity by varying the laser parameters (see fig. below). Cylindrical holes are burnt into the electrode layers (see fig. above), and the energy release simulates conditions as they also occur resulting from an internal short circuit. The released thermal energy can be enough to trigger a propagation effect, causing a thermal runaway of the cell.

The results will be published and made available to experts for discussion. Given appropriate feedback, this method could lead to a new test procedure for simulating internal short circuits in lithium cells after further development.

// Verlauf der Spannung und der Temperatur einer Lithium-Zelle beim Beschuss mit gepulstem Laser. // Development of voltage and temperature of a lithium cell during pulsed laser impact.

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

# // Performance- und Lebensdauertests zur Charakterisierung von Batteriesystemen

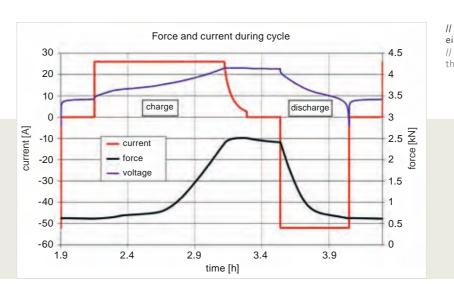
Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften, der Leistungsfähigkeit und des Alterungsverhaltens werden Batteriesysteme Performance- und Lebensdauertests unterzogen. Die Messaufgabe beinhaltet die Erfassung der Größen Strom, Zeit, Temperatur und Spannung und die daraus berechneten Größen. Zunehmend von Interesse ist die Verknüpfung der rein elektrischen Tests in einer Temperaturumgebung mit der Erfassung von mechanischen Größen, denn beim Laden und Entladen erfahren die Elektroden einer Lithium-Zelle eine Expansion bzw. eine Kontraktion, das "Atmen der Zelle". Erfolgt dies bei einer fixierten Zelldicke (Zelle ist in Platten geometrisch fest verspannt wie in einem Modul-Arrangement), so bewirkt dieser Atmungseffekt eine Kraftausbildung auf die Spannplatten, die gemessen werden kann. Diese "Atmung" ist zunächst reversibel, d. h. beim Laden wird eine Kraft aufgebaut, die beim Entladen wieder verschwindet (s. Grafik). Die Ursache der Kraftentwicklung ist verknüpft mit der Ein- und Auslagerung des Materials während des Lade- und Entladeprozesses und damit abhängig vom Ladegrad. Da dieser Prozess nicht vollständig reversibel ist, bleibt nach dem Durchlaufen eines Zyklus ein kleiner Kraft-Offset bestehen. Im Verlauf der Zyklisierung akkumuliert sich dieser Offset und kann eine beträchtliche Größe annehmen.

Kräfte auf die Elektroden wirken einerseits stabilisierend auf die Aktivmassenstruktur und können damit zur Erhöhung der Zyklenlebensdauer beitragen, andererseits können diese Kräfte wiederum die Stabilitätsgrenzen einer Modulverspannung übersteigen und somit lebensdauerbegrenzend wirken.

# // Performance and lifetime tests for the characterisation of battery systems

To characterise electrical properties, performance and ageing behaviour, the battery systems undergo performance and lifetime tests. The measuring task involves recording the variables of current, time, temperature and voltage and the mathematically derived values from these. An issue that is becoming increasingly interesting is linking purely electrical tests in a temperature environment with the measurement of mechanical variables. During charging and discharging, the electrodes of a lithium cell expand or contract, a process also referred to as "cell breathing". If this occurs with a fixed cell thickness (the cell geometrically and firmly clamped between plates as in a module arrangement), this breathing effect produces a measureable force acting on the clamping plates. Initially, this "breathing" is reversible, i.e. a force produced when charging disappears while discharging (see the chart). The cause of the force is related to the storage and removal of material during the charging and discharging process and thus depends on the charge level. Since this process is not entirely reversible, a small force offset will remain after completing one cycle. In the course of cycling, this offset accumulates and can build up to a considerable amount.

Forces acting on the electrodes exert a stabilising effect on the structure of active mass and can thus help increase cycle life, but they can also exceed the stress limits of a module and thereby shorten cycle life.



// Entwicklung der Kraft, die eine Zelle während eines Zyklus auf die Verspannplatten ausübt. // Development of the force that a cell exerts on the clamping plates during a cycle.

> // 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

Neue Energiespeicherkonzepte mit wässrigen Elektrolyten

Die effiziente, sichere und kostengünstige Speicherung elektrischer Energie wird zukünftig zu einer zentralen Herausforderung. Der Speicherbedarf umfasst wenige Sekunden, z.B. bei der Rückgewinnung von Bremsenergie in Maschinen oder Fahrzeugen, bis mehrere Stunden, z.B. für die Lastverschiebung bei der Stromerzeugung aus Solar- oder Windenergie. Dazu kommt die saisonale Speicherung regenerativ erzeugter Energie. Speicher mit wässrigen Elektrolyten wie Metall-Luft, Redox-Flow-Systeme oder Hochleistungsspeicher mit wässrigen Elektrolyten ermöglichen die Kurzzeitspeicherung. Für die saisonale Energiespeicherung und als Kraftstoff im Verkehr ist die effiziente und kostengünstige Erzeugung von Wasserstoff in hoher Reinheit über die Wasserelektrolyse von zunehmender Bedeutung. Die Qualität von Wasserstoff ist entscheidend für die Lebensdauer und die Betriebssicherheit von Brennstoffzellensystemen. Unser Forschungsfokus liegt daher auf neuen Aktivmaterialien, Komponenten und Zellkonzepten für diese Themen.

#### Materialien für die nächste Generation von Brennstoffzellen

Mit Alkohol betriebene Polymerelektrolytmembran-Brennstoff-zellensysteme (PEMFC) sind hinsichtlich Brennstofflogistik und Energiedichte attraktiv. Im Fokus der Arbeiten dazu stehen neue Funktionsmaterialien (Membranen, Elektrokatalysatoren etc.), die Entwicklung neuer Konzepte für Elektroden, Membran-Elektroden-Anordnungen etc. sowie die Bestimmung der Beständigkeit von Dichtungen oder Bipolarplatten. Darüber hinaus wird an verbesserten Betriebsstrategien für Alkoholbrennstoffzellen gearbeitet, die einen Betrieb bei erhöhter Temperatur und annähernd atmosphärischem Kathodendruck ermöglichen. Das Team verfügt über rund 25 Jahre Erfahrung mit elektrochemischen Energiewandlern und ist in der Lage, neue technologische Ansätze schnell im Labor zu verifizieren und zu demonstrieren.

// Our main focus

New energy storage concepts with aqueous electrolytes

The efficient, safe and cost-effective storage of electrical energy is a future key challenge. The storage requirement can last for a few seconds, for example when recovering braking energy from machinery or vehicles, to several hours, for example for load shifting in electricity generation from solar or wind power. Then there is the seasonal storage of regenerative energy. Storage systems with aqueous electrolytes, such as metal-air, redox flow systems or high-performance storage systems with aqueous electrolytes allow for short-term storage. The efficient and cost-effective production of high purity hydrogen via water electrolysis is of increasing importance for seasonal energy storage and for fuel for transportation. The quality of hydrogen is critical for the lifetime and reliability of fuel cell systems. Therefore, our research focuses on new active materials, components and cell concepts for these issues.

#### Materials for the next generation of fuel cells

Alcohol-fuelled polymer electrolyte membrane fuel cell systems (PEMFC) are attractive in terms of fuel logistics and energy density. Our work focuses on investigating new function materials (membranes, electrocatalysts, etc.), developing new concepts for electrodes, membrane-electrode assemblies, and so on, as well as determining the durability of seals and bipolar plates. In addition, improved operating strategies for alcohol fuel cells are being worked on, which will enable operation at higher temperatures and at approximately atmospheric cathode pressure. The team has 25 years of experience with electrochemical energy converters and is able to quickly verify new technological approaches in the laboratory and to demonstrate them.

## // Bipolare Verschaltung von Hochleistungsspeichern mit wässrigen Elektrolyten (PowerCaps)

Die Rückgewinnung von Bremsenergie bei Antrieben für Maschinen oder Fahrzeuge erfordert Energiespeicher, die kurzfristig hohe Leistungen aufnehmen und wieder abgeben können. Hochleistungsspeicher mit wässrigen Elektrolyten (PowerCaps) verfügen über diese höhere spezifische Leistung und erlauben sehr kurze Ladezeiten im Sekunden- und Minutenbereich. Ihre spezifische Energie ist höher als die der heute im Einsatz befindlichen Superkondensatoren.

Die bipolare Verschaltung von Einzelzellen in PowerCaps ist besonders aussichtsreich für die Minimierung von passiven Bauteilen und Kontaktflächen im Zellstapel. Typische Bordnetzspannungen in Fahrzeugen liegen im Bereich von 12 und 48 V. Daher sind Fahrzeugbordnetze mögliche Anwendungsfelder von Energiespeichern mit bipolaren Zellaufbauten von 10 bis 40 gestapelten Lagen.

Wegen der erwiesenen Robustheit von Metallhydrid-Nickel-Systemen wurden verschiedene bipolare Zelldesigns aufgebaut (s. Grafik), elektrochemisch charakterisiert und auf Praxistauglichkeit getestet. Zelldesigns mit 100 cm² Aktivfläche wurden mit industriell gefertigten Hochleistungselektroden aufgebaut. Hierbei mussten Fragen zur niederohmigen Kontaktierung der Elektroden, zur Optimierung des Elektrolytgehalts sowie zur Zellabdichtung bearbeitet werden. Das Konzept konnte mit einem zweizelligen Funktionsmuster verifiziert werden. Weitere Arbeiten zur Verbesserung der Eigenschaften sind geplant. // Bipolar connection of high-performance storage systems with aqueous electrolytes (PowerCaps)

Regenerative braking from machine or vehicle drive systems requires storage systems that are able to rapidly take in and release a high amount of power. High-performance storage systems with aqueous electrolytes (PowerCaps) have this higher specific power and allow very short charging times in the range of seconds and minutes. Their specific energy is higher than that of supercapacitors currently in use.

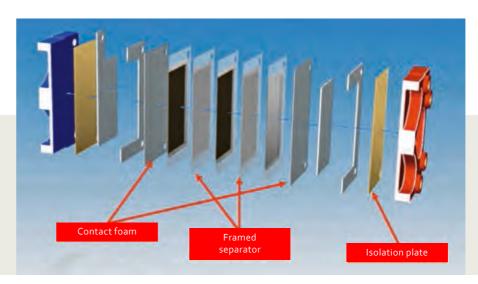
The bipolar connection of single cells inside PowerCaps is particularly promising in terms of minimising the use of passive components and contact surfaces in the cell stack. Vehicle voltages commonly range from 12 V to 48 V. Therefore, vehicle electrical systems are a viable application of energy storage systems featuring bipolar cell structures consisting of 10 to 40 stacked layers.

Due to the proven robustness of nickel metal hydride systems, various bipolar cell designs were constructed (see the chart), electrochemically characterised and tested for practicality. Cell designs with an active area of 100 cm² were produced with industrially manufactured high-performance electrodes. Issues regarding low-impedance electrode contacts, the optimisation of the electrolyte content and cell sealing had to be dealt with. The concept was verified using a two-cell function model. There are plans to work on further improving its properties.



"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, electrolysers, high power storage elements and metal-air cells."

// Dr. Ludwig Jörissen, Head of Department E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de, Phone: +49 (o) 731 95 30-605



// Explosionszeichnung eines zweizelligen Stacks in bipolarer Bauweise. // Explosion drawing of a bipolar 2-cell stack.

// Dr. Olaf Böse E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de Phone: +49(0)731 95 30-207

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

# // Dynamischer Betrieb von PEM-Brennstoffzellen

Dynamic operation of PEM fuel cells

// Stromdichteverteilung über die Zellfläche einer Brennstoffzelle im Zustand einer lastsprungbedingten anodenseitigen Wasserstoffunterversorgung. // Current density distribution across the cell surface of a fuel cell in a state of load variation-induced anode-side hydrogen deficiency.

#### // Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ist spezialisiert auf die Entwicklung von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Kernkompetenzen sind die Konstruktion, Charakterisierung und Simulation von Brennstoffzellen und Komponenten, der Bau von Prototypen und die Entwicklung von Fertigungs- und Prüftechnologien. Der Leistungsbereich der Entwicklungen zu PEMFC-Komponenten und -Stacks umfasst wenige Watt bis zu 100 kWel. Optimiert werden 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, automobiltaugliche Brennstoffzellen sowie die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks. Beispielsweise können Gasdiffusionslagen (GDL) hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit und ihrer Struktur analysiert werden.

Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels 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  $\mu\text{-CT-Anlage}$  validiert. Mit dieser Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden.

Gemeinsam mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte und durchgeführte Verfahren im Bereich der Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie ermöglichen die Visualisierung von Komponenten, Zellen und Stacks mit zeitlichen und räumlichen Auflösungen, die zu den weltweit besten Werten gehören.

// Our main focus

The research department is specialised in the development of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC). Core areas of expertise are construction, characterisation and simulation of fuel cells and components, the construction of prototypes and the development of production and test technologies. The development of PEMFC components and stacks encompasses performance capacities ranging from just a few watts to 100 kW<sub>el</sub>. We optimise the output, service life, efficiency and compactness of fuel cells. Among other things, this includes the study and forecast of ageing processes and failure analyses. We also focus on developing manufacturing methods, automotive fuel cells, and characterising PEMFC components, cells and stacks. Gas diffusion layers (GDL), for example, can be analysed in terms of their surface properties and structure.

Modelling and simulating processes in fuel cells allow for a 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 using informative and substantial hardware and experiments under realistic conditions. For example, water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using an  $\mu\text{-CT}$  system. With this system, gas diffusion layers, including their water content, can also be examined in a compressed state.

In order to visualise components, cells and stacks with temporal and spatial resolutions, we also apply world-leading processes involving neutron and synchrotron radiography and tomography that we jointly developed and now conduct with the Helmholtz Centre Berlin (HZB).

// Untersuchung des Degradationsverhaltens beim dynamischen Betrieb der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC)

Die PEMFC eignet sich aufgrund ihrer flexiblen Betriebseigenschaften und ihrer hohen Energieeffizienz als alternatives Antriebskonzept für Fahrzeuge. Für den Einsatz im Automobil sind eine hohe Leistungsdichte sowie eine hinreichend große Lebensdauer sicherzustellen. Besonders die beim dynamischen Betrieb auftretenden Zustände lokaler Unterversorgung mit Reaktandengas können eine beschleunigte Degradation und dadurch eine verkürzte Lebensdauer der PEMFC hervorrufen.

Die Methodik zur Untersuchung des dynamischen Betriebs wurde innerhalb eines abgeschlossenen sowie eines laufenden Förderprojekts weiterentwickelt und an spezifischen Komponenten erprobt, indem an Labor-Brennstoffzellen Einzel-Lastsprung-Experimente (s. Abb. unten) und dynamische Fahrzyklusexperimente durchgeführt wurden. Mittels nichtdispersiver Infrarot(NDIR)-Sensoren konnte das als Folge von lokalen Unterversorgungszuständen emittierte Kohlendioxid im Kathoden-/Anoden-Abgas detektiert werden.

Weiterhin wurden diese Unterversorgungszustände während des dynamischen Betriebs mittels lokaler Stromdichtemessung untersucht (s. Abb. oben) und durch weitere Charakterisierungsuntersuchungen (U-I-Kennlinien, CV- und EIS-Messungen) unterstützt. Es konnte eine signifikante Abnahme der Zellleistung infolge der kritischen Betriebszustände während des dynamischen Betriebs identifiziert werden, die einerseits mit der Reduzierung der elektrochemisch aktiven Oberfläche des Katalysators sowie andererseits mit der Zunahme der Stofftransport- und Zellwiderstände als Folge der Degradation erklärt werden können. Dies zeigt, dass eine adäquate Kontrollstrategie zur Vermeidung solcher kritischer Betriebszustände notwendig ist, um die Lebensdauer der PEMFC z. B. für die automobile Anwendung zu gewährleisten.

// Examination of the degradation behaviour during dynamic operation of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)

PEMFCs are a suitable alternative drive concept for vehicles due to their flexible operating characteristics and their high energy efficiency. A high power density and a sufficiently long lifetime must be ensured for automotive applications. In particular, the conditions of local undersupply of reactant gas that occurs during dynamic operation can cause accelerated degradation and thereby shorten the service life of the PEMFC.

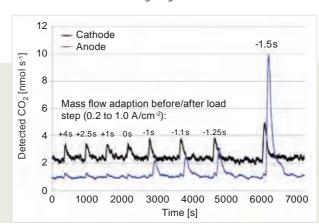
The method for examining dynamic operation has been further developed in one finalised and one ongoing funded project and was tested on specific components by carrying out single-cell load variation (see the chart below) and dynamic driving cycle experiments on laboratory fuel cells. Using non-dispersive infrared (NDIR) sensors, carbon dioxide emitted as a result of local undersupply states was detected in the gas released by the cathode and anode.

Furthermore, these undersupply states were investigated during dynamic operation by means of local current density measurements (see the chart above) and supported by further characterisation studies (UI characteristics and CV and EIS measurements). A significant decrease in cell performance due to the critical operating conditions was identified during dynamic operation. This can, on the one hand, be explained by a reduction of the electrochemically active surface area of the catalyst and, on the other, by an increase in mass transfer resistance and cell resistance due to degradation. This illustrates the necessity of an adequate control strategy to avoid such critical operating conditions in order to ensure the required lifetime of PEMFCs, for example for automotive applications.



"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."

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



// Detektiertes  $CO_2$  – das Produkt der Kohlenstoffkorrosion – im Anoden-/Kathoden-Abgas einer PEMFC. // Detected  $CO_2$  – the product of carbon corrosion – in the anode/cathode exhaust gas of a PEMFC.

> // Simon Enz E-mail: simon.enz@zsw-bw.de Phone: +49(0)731 95 30-208



// Simulation von Mikrostrukturen in Komponenten
Simulation of microstructures in components

// 3-D-GDL-Mikrostruktur aus µ-CT-Daten.
// 3D GDL microstructure created using µ-CT data.

// CFD-Vollzellmodellierung zur Unterstützung einer gezielten Materialentwicklung im Bereich automotiver PEMFC-Membran-Elektroden-Einheiten

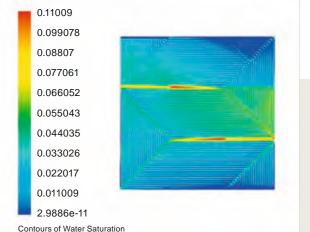
Um die spezifizierte Leistungsdichte von 1 Wcm<sup>-2</sup> (1,5 Acm<sup>-2</sup> bei 0,675 V) für die automobile Anwendung der PEMFC unter Einhaltung eines marktfähigen Kostenrahmens zu erreichen, ist die Entwicklung neuer, optimierter Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) mit besonders niedrigem Platingehalt notwendig. Innerhalb des von der Europäischen Union geförderten Projekts IMPACT sollen solche neuartigen MEA-Einheiten für den Einsatz im Automobilsektor gezielt entwickelt werden.

Zunächst wurde eine reale Brennstoffzelle im entsprechenden Design inklusive aller Komponenten und ihrer Materialeigenschaften in der CFD-Simulationssoftware (Computational Fluid Dynamics) nachgebildet. Das eingesetzte Modell berücksichtigt hierbei die Strömungsverhältnisse in den Verteilerfeldern (s. Abb.), die Transporteigenschaften der porösen Materialien und die ablaufenden elektrochemischen Vorgänge. Unter Verwendung von für kommerzielles Material üblichen Eigenschaften der MEA konnten die mit dem Referenzmaterial gemessenen Leistungsdaten der Zelle sehr gut reproduziert werden. In einem zweiten Schritt wurden gemessene, an die Leistungsdaten der Zelle angepasste Materialeigenschaften verwendet, um das Verhalten der ersten im Projekt hergestellten Materialgeneration zu reproduzieren. Ausgehend davon wurden zuletzt charakteristische Materialeigenschaften im Modell variiert, sodass die als Zielwert spezifizierte Leistungsdichte in der Simulation erreicht wurde. Die aus der Variation erhaltenen physikalischen Kennzahlen werden im weiteren Verlauf des Projekts als Richtschnur verwendet, um die MEA-Entwicklung gezielt fortzuführen.

// CFD full cell modelling to support specific material development in the area of automotive PEMFC membrane electrode assemblies

The development of new optimised membrane electrode assemblies (MEA) with a very low platinum content is necessary in order to achieve the specified power density of 1 W cm<sup>-2</sup> (1.5 Acm<sup>-2</sup> at 0.675 V) for the automotive application of PEMFCs while maintaining marketable costs. As part of the project IMPACT, funded by the European Union, the novel MEA units are being developed specifically for use in the automotive sector.

To start with, a complete fuel cell with its corresponding design was modelled using CFD simulation software (computational fluid dynamics), including all components and their material properties. The model used accounts for flow conditions in the distribution fields (see the chart), transport properties of porous materials and occurring electrochemical processes. Using material properties of standard commercially available MEAs, the cell performance values of reference materials were easily reproduced. In a second step, material properties as measured or adapted to the cell performance were used to reproduce the behaviour of the first project material generation. Based on this, characteristic material properties were varied within the model so that the targeted power density value was achieved in the simulation. The physical characteristics obtained from these variations are subsequently used to guide the development of MEAs.



// Die in der Abbildung wiedergegebene kathodenseitige Flüssigkeitsverteilung zeigt, dass lediglich im Bereich der Mäandergrenzstege erhöhte Werte der Wassersättigung zu erwarten sind.

// The illustrated liquid water distribution on the corresponding cathode side indicates that increased water saturation degrees appear only along the meander edge ribs.

// Dr. Florian Wilhelm E-mail: florian.wilhelm@zsw-bw.de Phone: +49(0)731 95 30-203

# // Simulation des Stofftransports in den Mikrostrukturen realer Gasdiffusionslagen

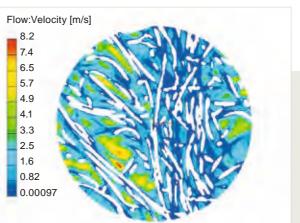
Für die Leistung einer PEMFC ist der Reaktandentransport zum Katalysator durch die Gasdiffusionslage (GDL) limitierend. Inhomogenitäten der GDL- Mikrostruktur aufgrund ungleichmäßiger Verpressung oder der Blockade von Poren mit flüssigem Wasser erzeugen eine ungleichmäßige Stromdichteverteilung. Das vermindert die Zellleistung und beschleunigt die Komponentenalterung. Herkömmliche CFD-Modelle treffen bezüglich der GDL vereinfachende Annahmen und verwenden integrale Parameter wie Porosität und Permeabilität zur Berücksichtigung der porösen Struktur. Dadurch kann der Stofftransport gleichmäßiger erscheinen, als er in Wirklichkeit ist.

Für das Projekt wurde der konvektive Stofftransport in einem auf mikroskopischer Ebene real abgebildeten GDL-Substrat mit der CFD-Software AVL FIRE® simuliert (s. Abb. unten). Die Strukturen verschiedener GDL-Substrate wurden mit einem Computertomographen (μ-CT) mit einer nominellen Auflösung von 0,5 μm digitalisiert (s. Abb. oben). Anschließend wurde die 3-D-Oberflächengeometrie aufgearbeitet, das Oberflächengitter in AVL importiert und daraus das 3-D-Berechnungsgitter für die GDL-Substratporen erzeugt. Die GDL-Fasern besitzen einen mittleren Durchmesser von ca. 7–10 μm, der betrachtete Ausschnitt liegt bei 500 μm bei einer GDL-Dicke von 200 µm. Das daraus resultierende Berechnungsgitter besitzt ca. 10 Millionen Berechnungselemente. Es hat sich gezeigt, dass der Stofftransport auf der Mikroskala der realen GDL-Poren nicht gleichmäßig stattfindet und dass es abhängig vom GDL-Material bevorzugte Transportpfade gibt. Aus den Ergebnissen können Transportparameter für die standardmäßigen CFD-Programme bestimmt und damit die Modellierungsgenauigkeit erhöht werden.

// Simulation of mass transfer in the microstructures of real gas diffusion layers

The transport of reactants to the catalyst by the gas diffusion layer (GDL) is the limiting factor for the performance of a PEMFC. Inhomogeneities of the GDL microstructure, due to uneven compression or blockage of pores with liquid water, produce a non-uniform current density distribution. This lowers the cell's performance and accelerates component ageing. Regarding to the GDL, conventional CFD models make simplifying assumptions and use integral parameters such as porosity and permeability to account for the porous structure. This may make mass transport appear more uniform than it actually is.

For the project, convective mass transport was simulated in a microscopically accurate GDL substrate using the CFD programme, AVL FIRE® (see fig. below). The structures of the various GDL substrates were digitised by means of computer tomography ( $\mu$ CT) with a nominal resolution of 0.5  $\mu$ m (see fig. above). In a following step, the 3D surface geometry was processed and the surface mesh was imported into AVL and used to generate the 3D calculation mesh for the GDL substrate pores. The GDL fibres have an average diameter of approximately 7-10 µm, the considered section size is 500 µm at a GDL thickness of 200 µm. The resulting computational mesh has about 10 million elements. It was demonstrated that mass transfer on the microscopic level of real GDL pores does not take place uniformly and that there are preferred transport routes that depend on the GDL material. Using these results, transport parameters for standard CFD programs can be determined, thereby increasing the accuracy of models.



// Geschwindigkeitsprofil (GDL-Mitte). // Velocity profile (GDL centre).

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

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

# // Erweiterung des Brennstoffzellen-Testfeldes Expansion of the fuel cell test field 40000 35000 25000 25000 15000 10000 2011 2012 2013 2014 Year

// Brennstoffzellen-Teststunden im ZSW.

#### // Unsere Kernkompetenzen

#### Brennstoffzellensysteme

Langjährige Erfahrung bildet unsere Basis für die Entwicklung von Systemen für die unterschiedlichsten Anwendungen: von wenigen Watt bis 100 kW sowie von stationären Anlagen über Bordstrom- und Notstromversorgungen bis hin zu Fahrzeugsystemen. Unser Leistungsspektrum umfasst komplette Prototypen einschließlich der Steuerung und Hybridisierung mit Batterien und DC/AC-Wandlern. Wir unterstützen Industriepartner bei der Entwicklung und Erprobung von Systemkomponenten, bei Sicherheitsbewertungen, bei Packaging-Studien und bei der Produktzertifizierung.

#### Brennstoffzellentests

Wir betreiben ein Testzentrum mit 25 vollautomatisierten Testständen von 0,1 bis 120 kW zur kosteneffizienten Rund-um-die-Uhr-Charakterisierung von Brennstoffzellenstacks, -systemen und -systemkomponenten. Eine umfangreiche Analytik ermöglicht die detaillierte Bewertung von Alterungsvorgängen und ausführlichen Fehleranalysen. Seit Sommer 2012 können Brennstoffzellen bis 100 kW<sub>el</sub> auch nach der DIN EN 62282-2 geprüft werden. Unsere Industriepartner nutzen streng vertraulich durchgeführte Tests und das langjährige Know-how unserer Experten, um ihre Produkte besser zu verstehen, weiterzuentwickeln und deren Sicherheit nachzuweisen. In öffentlich geförderten Projekten werden wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen.

#### Reformer für flüssige Brennstoffe

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

#### Fuel cell systems

Our many years of experience form the basis for the development of various systems, ranging from a few watts to 100 kW and from stationary systems and on-board and emergency power supplies up to automotive systems. Our scope of services comprises complete prototypes, including their control and hybridisation with batteries and DC/AC converters. We support industry partners with developing and testing system components, safety assessments as well as packaging studies and product certification.

#### Fuel cell tests

In order to characterise fuel cell stacks, systems and system components cost-efficiently in 24/7 operation, we run a test centre with 25 fully automated test benches with 0.1 to 120 kW. Different analysis systems permit detailed assessments of ageing processes and failure reports. Since the summer of 2012, fuel cells of up to 100 kW<sub>el</sub> have been able to be tested in accordance with DIN EN 62282-2. Our industrial partners employ strictly confidential tests and leverage the long-standing know-how of our experts to better understand their products, develop them and demonstrate their safety. Valuable data and experience are gathered in publicly funded projects, which are also available to the public.

#### 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 also build complete reforming systems.

#### // Erweiterung des Brennstoffzellen-Testfeldes

Der Bedarf an Tests von Brennstoffzellen steigt weltweit und die zunehmende Nachfrage nach unabhängigen Testeinrichtungen zeigt sich z.B. in der Betriebszeit unserer Brennstoffzellen-Teststände, die sich im Jahr 2014 auf knapp 35.000 Stunden summierte und voraussichtlich weiter zunehmen wird (s. Grafik oben).

Die Interpretation der Testergebnisse erfordert inzwischen ein sehr tiefgehendes Verständnis des Zusammenspiels von Materialien und Komponenten in den Zellen und Stacks. Dafür sind spezielle Analysemethoden und testbegleitende Simulationen erforderlich und Mitarbeiter mit langjähriger Erfahrung unabdingbar. Auch die Anforderungen an die Tests selbst nehmen zu. So müssen sämtliche Mess- und Prüfmittel (darunter auch die Sensoren und Aktoren der Teststände) regelmäßig kalibriert werden, und immer öfter werden aufwendige Adaptionen und Erweiterungen der Teststände verlangt (z. B. für beschleunigte Alterungstests, s. Grafik unten).

Da das ZSW die Nachfrage mit den vorhandenen Prüfständen kaum mehr decken konnte, wird das BZ-Testfeld seit August 2014 mit Mitteln des Bundeswirtschaftsministeriums erweitert. Unter anderem

- > werden fünf neue Teststände (darunter zwei Eigenbauten) beschafft, aufgebaut, mit der nötigen Infrastruktur und den erforderlichen Sicherheitseinrichtungen versehen und in Betrieb genommen,
- werden alle Teststände mit einer über Jahre perfektionierten eigenen Steuersoftware ausgestattet, damit auch gekaufte Teststände die für Forschungsvorhaben nötige Flexibilität bekommen,
- > wird die testbegleitende Gasanalytik verstärkt,
- > wird die testbegleitende In-situ- und Post-Mortem-Analytik verstärkt.

#### // Expansion of the fuel cell test field

The need for testing fuel cells is increasing worldwide, and the increasing demand for independent testing facilities is evidenced by the uptime of our fuel cell test benches, which in 2014 amounted to almost 35,000 hours with an expected further increase (see the chart above).

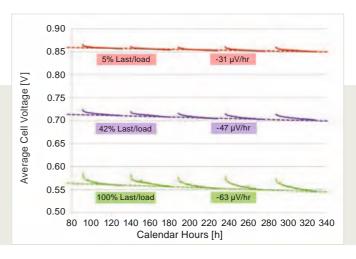
Today, interpreting test results requires a very deep understanding of the interplay between materials and components in cells and stacks. This calls for special analysis methods and simulations accompanying the tests, and highly experienced staff are essential. Requirements for the tests themselves are becoming stricter as well. All measuring and test equipment (including the sensors and actuators of the test rigs) must be calibrated regularly, and complicated adaptations and extensions to the test rigs are demanded increasingly often (for example for accelerated ageing tests, see the chart below).

Since ZSW was hardly able to meet demand with its existing test rigs, the fuel cell test field is being expanded since August 2014, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Amongst other things,

- > five new test benches (including two self-made) are being procured, assembled, equipped with the necessary infrastructure and the required safety devices and put into operation,
- > all test benches will feature a self-developed control software that was perfected over the years so that the purchased test benches will also acquire the flexibility required for research projects,
- > gas analysis accompanying the tests is being expanded,
- > in situ and post mortem analysis is being expanded.

"Langfristig sind die weltweiten Klimaziele ohne Wasserstofftechnologien nicht zu erreichen." "In the long run, global climate goals will not be achievable without hydrogen technology."

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



// Darstellung der Spannungsdegradation als Ergebnis eines beschleunigten Alterungsexperiments.
// Visualization of voltage degradation as result of an accelerated aging test.

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

 $6_4$ 





Unsere Themen 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 2014.

The issues we tackle are complex. They span a number of 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. The following review provides you with an insight into our events and public relations work in 2014.

## // Feierliche Einweihung der Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen

Am 26. September kamen Bundesforschungsministerin Johanna Wanka und über 300 weitere hochrangige Vertreter aus Industrie, Wissenschaft und Politik zur Inbetriebnahme der Forschungsplattform zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen (FPL) ins ZSW. Ministerin Wanka sprach über die Batterieforschung in Deutschland. Die Rolle neuer Technologien für Baden-Württemberg erörterte Staatssekretär Ingo Rust vom Ministerium für Finanzen und Wirtschaft, die Batterieforschung in der Wissenschaftsstadt Ulm der Präsident der Universität Ulm, Prof. Dr. Karl Joachim Ebeling. Die Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen in Deutschland im globalen Vergleich zeigte der Vice President von BASF Battery Materials, Dr. Adrian Steinmetz, auf. Prof. Dr. Thomas Weber, Vorstandsmitglied der Daimler AG, schilderte die Batteriestrategie der Nationalen Plattform Elektromobilität. Die Veranstaltung zeigte deutlich den Bedarf an einer effizienten Kooperation zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, die mit der FPL eine neue Qualität erreicht, um die Wertschöpfung im Bereich von Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland deutlich zu erhöhen.

#### // Mit der Eröffnung des HIU wird Ulm zur internationalen Hochburg der Batterieforschung

Durch die Übergabe des neuen, vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und der Universität Ulm getragenen Helmholtz-Instituts Ulm (HIU) durch Bundesforschungsministerin Johanna Wanka am

## // Inauguration of the Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells

On 26 September, Federal Minister Johanna Wanka and over 300 other high-ranking representatives from industry, academia and politics came to the startup of the Research Platform for the Production of Lithium-ion Cells (FPL) to the ZSW. The Minister spoke about battery research in Germany. The role new technologies play in Baden-Württemberg was discussed by State Secretary Rust of the Ministry of Finance and Economics, and Prof. Dr. Karl Ebeling, the President of Ulm University, discussed battery research in the Science City of Ulm. The Vice President of BASF Battery Materials, Dr. Adrian Steinmetz, talked about the production of lithium-ion cells in Gemany and provided a global comparison. Prof. Dr. Thomas Weber, Member of the Board of Daimler AG, explained the battery strategy of the National Electromobility Platform. The event clearly demonstrated the need for efficient cooperation between science and industry – which reaches a new level of quality with the FPL, in order to significantly increase added value in the area of lithium-ion batteries in Germany.

## // With the opening of the HIU, Ulm is now the international stronghold of battery research

With the inauguration of the new Helmholtz Institute Ulm (HIU), supported by the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and Ulm University, by the German Federal Minister of Research and Education Johanna Wanka on 31 October 2014, the number

// Bundesministerin Wanka startete die FPL am 26.9.2014 im Beisein von ZSW-Vorstand Tillmetz, ZSW-Projektleiter Stern, Staatssekretär Rust, Daimler-Vorstand/NPE-AG-2-Leiter Weber, BASF-Vizepräsident/KLiB-Vorstand Steinmetz (v. l. n. r.).

// German Federal Minister Wanka launched FPL on 26/09/2014 in the presence of ZSW Board Member Tillmetz, ZSW Project Manager Stern, State Secretary Rust, Daimler Board Member/NPE AG-2 Head Weber, BASF Vice President/KLiB Board Member Steinmetz (f. l. t. r.).



31. Oktober 2014 steigt die Zahl der Batterieforscher in Ulm auf rund 300. Das ZSW war Mitinitiator des HIU und ist zusammen mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) assoziiertes Partnerinstitut. Rund die Hälfte der HIU-Forscher arbeitet am ZSW. Inhaltlich decken die vier Wissenschaftsinstitutionen die gesamte Breite der Batterieforschung ab – von den Grundlagen an Uni und HIU bis zur angewandten Forschung am ZSW. Die fünf Forschungsgebiete werden von Wissenschaftlern der Institute geleitet. Das ZSW führt mit Fachgebietsleiterin Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens eine Forschungsgruppe zu neuen Materialien und mit Dr. Michael Danzer eine zu Batteriesystemen.

#### // Rund 50 Vertreter der Batteriebranche loteten im eLaB Chancen für gemeinsame Projekte aus

Im Industrieverbund Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen Batterien e. V. (KLiB) sind die deutschen Akteure entlang der Wertschöpfungskette organisiert. Vom Rohmaterial bis zur fertigen Lithium-Ionen-Zelle, von der Chemieindustrie bis zum Automobilhersteller sind alle Branchen vertreten. Mehr als 50 Industrievertreter trafen sich am 24. November 2014 im eLaB, um Möglichkeiten und Chancen der neuen Forschungsplattform zu erörtern.

of battery researchers in UIm rose to around 300. ZSW was one of the initiators of the HIU and is an associated partner institute together with Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). About half of the HIU researchers work at ZSW. The four science institutes cover the entire body of battery research – from fundamentals at the university and the HIU, to applied research at ZSW. The five areas of research are led by scientists at the institutes. With head of department Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens, ZSW maintains a research group on new materials and with Dr. Michael Danzer, one on battery systems.

# // Some 50 representatives of the battery industry explored opportunities for joint projects in the eLaB

The German actors along the value chain are organised in the industrial association of the Lithium-Ion Batteries Competence Network (KLiB). All sectors are represented, from raw materials to finished lithium-ion cells, and from the chemical industry to car manufacturers. Over 50 industry representatives met in the eLaB on 24 November 2014 to discuss possibilities and opportunities presented by the new research platform.



// Moderierte Podiumsdiskussion bei der HIU-Einweihung (v.l.n.r.):
Prof. Ebeling (Präsident Universität Ulm), Prof. Hanselka (Präsident KIT),
Prof. Tillmetz (Vorstandsmitglied ZSW), Prof. Hahn (KIT), Prof. Wagner (DLR).
// Moderated panel discussion at the inauguration of the HIU (f.l.t.r.):
Prof. Ebeling (President of university of Ulm), Prof. Hanselka (President KIT),



// Rundgang zur 13. Internationalen Festo-Pressekonferenz.
// Tour on the occasion of the 13<sup>th</sup> International Festo press conference.

Prof. Tillmetz (Member of Board ZSW), Prof. Hahn (KIT), Prof. Wagner (DLR).

### // Prof. Frithjof Staiß (ZSW) beim Impulsvortrag im Rahmen des Parlamentarischen Abends mit der KEA.

// Prof. Frithjof Staiß (ZSW) making a keynote speech during KEA's parliamentary evening.



// Die ZSW-Vorstände Staiß und Powalla empfangen Japans früheren Regierungschef Naoto Kan (Mitte), Generalkonsul Akira Mizutani (rechts) sowie den Präsidenten des Renewable Energy Institutes, Tamiyoshi Tachibana. // ZSW Board Members Staiß and Powalla are welcoming Japan's former Prime Minister Naoto Kan (centre), Consul General Akira Mizutani (right) and the president of the Renewable Energy Institute, Tamiyoshi Tachibana.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Prof. Michael Powalla (links) überreicht dem Parlamentspräsidenten von Kanagawa/Japan, Shigeyuki Mukasa, eine Solaruhr.

// Prof. Powalla (left) presents the Kanagawa Parliament Head, Shigeyuki Mukasa, with a solar clock.



## // Mehr als 80 Technikjournalisten aus aller Welt besichtigten das Ulmer eLaB

Am 25. September 2014 besuchten über 80 internationale Journalisten aus dem Bereich Technik das eLaB, um die neue Forschungsplattform für die industrielle Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen (FPL) kennenzulernen. Die Journalistentour "Welcome to the E-Future – Electric Automation Solutions for Globally Successful Customers" hatte ein Industriepartner organisiert, um anhand der Forschungsanlage seine neueste Produktionstechnologie vorzuführen. Prof. Werner Tillmetz referierte zum Thema "Innovative battery solutions for e-mobility".

#### // Parlamentarischer Abend zum Thema Energieeffizienz

Am 11. Dezember veranstalteten die Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA) und das ZSW einen Parlamentarischen Abend. Unter dem Motto "Energieeffizienz jetzt! – Macht die Politik ernst?" diskutierten rund 80 Teilnehmer mit Dr. Volker Kienzlen und Dr. Martin Sawillion (beide KEA) sowie mit Prof. Dr. Frithjof Staiß und Maike Schmidt (beide ZSW) im Stuttgarter Literaturhaus.

#### // Ehemaliger Premierminister Japans zu Gast am ZSW

Der frühere Premierminister Naoto Kan, Generalkonsul Akira Mizutani sowie der Präsident des Renewable Energy Instituts, Tamiyoshi Tachibana, waren Teil einer hochrangigen Delegation aus Japan am 20. März 2014. Im Vordergrund des vom Staatsministerium Baden-Württemberg begleiteten Besuchs stand die Frage, welchen Beitrag Wasserstoff zur Energiewende leisten kann. Die Power-to-Gas-Demoanlage des ZSW stieß dabei auf besonders großes Interesse. Naoto Kan, in dessen Amtszeit die Fukushima-Katastrophe fiel, zeigte sich vor allem von den Chancen beeindruckt, die Power-to-Gas (P2G®) für die künftige Mobilität bietet: Die beiden regenerativ erzeugten Gase aus dem P2G®-Prozess (Wasserstoff und Methan) können als Kraftstoffe für Brennstoffzellen- bzw. Erdgasfahrzeuge dienen.

### // Over 80 technology journalists from around the world visited the eLaB in Ulm

On 25 September 2014, over 80 international technology journalists visited the eLaB to get an impression of the new Research Platform for the Industrial Production of Lithium-ion Cells (FPL). The journalists' tour "Welcome to the E-Future – Electric Automation Solutions for Globally Successful Customers" had been organised by an industrial partner to present their latest production technology with the help of the research facility. Prof. Werner Tillmetz lectured on "Innovative battery solutions for e-mobility".

#### // Parliamentary evening on energy efficiency

Under the motto of "Energy Efficiency Now! – Is the government getting down to business?", Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA) and ZSW organised a parliamentary evening on 11 December, during which around 80 participants discussed matters with Dr. Volker Kienzlen and Dr. Martin Sawillion (both KEA), and with Prof. Dr. Frithjof Staiß and Maike Schmidt (both ZSW) at the Literaturhaus Stuttgart.

#### // Former Japanese Prime Minister visits ZSW

Former Prime Minister Naoto Kan, Consul General Akira Mizutani and the President of the Renewable Energy Institute, Tamiyoshi Tachibana, were part of a high-level delegation from Japan on 20 March 2014. The predominant topic of the visit, accompanied by the State Ministry of Baden-Württemberg, was the possible contribution of hydrogen to the energy transition. ZSW's Powerto-Gas demonstration plant was received with great interest. Naoto Kan, within whose term of office the Fukushima disaster fell, was particularly impressed by the opportunities Power-to-Gas (P2G®) offers to future mobility: the two renewably produced gases of the P2G® process (hydrogen and methane) can be used as fuels for fuel cell and natural gas vehicles.

## // Weitere Besuchergruppen aus Japan, China, Oberösterreich und der Westschweiz

Zwei weitere japanische Gruppen waren am 11. November 2014 am ZSW zu Gast: Vormittags informierte sich der Gouverneur der Präfektur Gifu – in Begleitung von Ministerialdirektor Helmfried Meinel (Umweltministerium Baden-Württemberg) – mit einer Delegation aus Unternehmensvertretern und Journalisten über die Arbeit des ZSW. Im Umfeld des Besuchs wurde eine Zusammenarbeit zwischen dem ZSW und dem Center of Innovative Photovoltaic Systems der Universität Gifu im Bereich der Solarenergie vorbereitet. Am Nachmittag fand sich anlässlich der 25-jährigen Partnerschaft des Landtags Baden-Württemberg mit der japanischen Provinz Kanagawa eine Parlamentarierdelegation unter der Leitung des Parlamentspräsidenten Shigeyuki Mukasa am ZSW ein.

Zu den weiteren Gästen des ZSW zählten der oberösterreichische Landesrat für Umwelt, Energie, Wasser und KonsumentInnenschutz mit seinem Kabinettschef sowie eine Gruppe von chinesischen Umweltjournalisten. Ein weiterer Besuch kam aus der Westschweiz: Im Vordergrund des Interesses der Regierungsvertreter mehrerer Kantone stand die Frage, wie die Energiewende in Baden-Württemberg technologisch und politisch umgesetzt wird.

## // Other groups of visitors from Japan, China, Upper Austria and Western Switzerland

Two other Japanese groups visited ZSW on 11 November 2014: in the morning, the governor of Gifu Prefecture – accompanied by the head of the ministry department Helmfried Meinel (Baden-Württemberg Ministry of the Environment) – picked up information about ZSW's work, accompanied by a delegation of business representatives and journalists. In the context of the visit, a collaboration between ZSW and the Center of Innovative Photovoltaic Systems of Gifu University in the area of solar energy was arranged. In the afternoon and on the occasion of the 25-year partnership of the state parliament of Baden-Württemberg with the Japanese province of Kanagawa, a parliamentary delegation headed by the Head of Parliament Shigeyuki Mukasa arrived at the ZSW building.

Other guests at ZSW included the Upper Austrian member of the provincial government responsible for the environment, energy, water and consumer protection together with his cabinet chief and a group of Chinese environmental journalists. Other visitors came from Western Switzerland: the main focus of the government representatives of several cantons was the question of how the energy transition in Baden-Württemberg is being implemented technologically and politically.



// REG-Fachgebietsleiter Dr. Michael Specht erläutert den österreichischen Gästen die ZSW-Elektrolyse. // REG department head Dr. Michael Specht explains ZSW electrolysis to the Austrian quests.



// Die Schweizer Delegation um Dr. Beat Vonlanthen (rechts), Präsident des Staatsrats im Kanton Freiburg, betrachtet das Power-to-Gas-Modell. // The Swiss delegation led by Dr. Beat Vonlanthen (right), President of the State Council of the Canton of Fribourg, inspecting the Power-to-Gas model



// Öffentlichkeitsarbeit **Public Relations** 

19/02/2014

12-14/03/2014

7-11/04/2014

4-6/06/2014

23-26/06/2014

23-25/09/2014

24/11/2014

// In 2014, ZSW was represented at the following trade fairs:

// Hanover Industrial Trade Fair: Group Exhibit Hydrogen +

At the Hanover trade fair, ZSW provided information on current

projects for the local storage of solar power, batteries, hydrogen

and fuel cells. With "Autostack CORE", a European collaborative

and research partners will develop automotive fuel cells with op-

timised components and a matching test programme. Another

highlight was "Sol-ion+", a project to increase own consumption

of solar power. A project for alkaline pressure electrolysis was

project was launched, in the context of which nine industrial

21th DESIGN&ELEKTRONIK developer forum

29th Symposium for Photovoltaic Solar Energy,

Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells + Batteries

14th Ulm ElectroChemical Talks (UECT), Ulm

European PV Solar Energy Conference and

Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam

Batteries and charging concepts, Munich

Bad Staffelstein

Hanover Industrial Trade Fair

KLiB information event, Ulm

Fuel Cells + Batteries

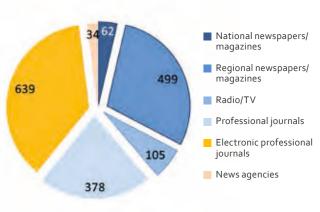
also presented.

Intersolar Europe, Munich

// Voller Saal: Besucherrekord mit über 320 Teilnehmern auf der 14. UECT. // Full hall: attendance record with over 320 participants at the 14th UECT.



// Aufteilung der 1.717 Medienergebnisse des Jahres 2014 auf die Medienarten. // Division of 1.717 media results in 2014 into media types

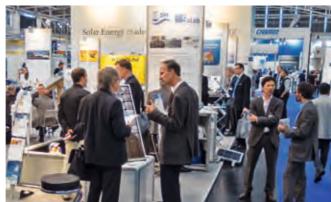


#### // Das ZSW war 2014 auf folgenden Messen vertreten:

"	
21. DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum	
Batterien und Ladekonzepte, München	19.2.201
29. Symposium für Photovoltaische Solarenergie,	
Bad Staffelstein	1214.3.201
Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells + Batteries,	
Hannover Messe Industrie	711.4.201
Intersolar Europe, München	46.6.2014
14. Ulm ElectroChemical Talks (UECT), Ulm	2326.6.201
European PV Solar Energy Conference and	
Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam	2325.9.201
KLiB-Infoveranstaltung, Ulm	24.11.201

#### // Hannover Messe: Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells + **Batteries**

Das ZSW informierte in Hannover über aktuelle Projekte zur lokalen Speicherung von Solarstrom, zu Akkumulatoren, Wasserstoff und Brennstoffzellen. Mit "Autostack CORE" wurde ein europäisches Verbundprojekt vorgestellt, bei dem neun Partner aus Industrie und Forschung fahrzeugtaugliche Brennstoffzellen mit optimierten Komponenten und einem passenden Testprogramm entwickeln. Ein weiteres Highlight war "Sol-ion+", ein Projekt zur Steigerung des Eigenverbrauchs von Solarstrom. Des Weiteren wurde ein Projekt zur alkalischen Druckelektrolyse vorgestellt.



// Beliebter Expertentreff: ZSW-Stand auf der Hannover Messe 2014. // Popular expert meeting: ZSW booth at the Hanover Industrial Trade Fair 2014.

// Stand der Photovoltaik-Systemtechniker auf der Intersolar Europe in München. // Photovoltaic systems engineering booth at Intersolar Europe in Munich.

#### // Intersolar Europe, München

Auch in diesem Jahr präsentierten sich die ZSW-Systemtechniker aus dem Bereich Photovoltaik auf der Intersolar. Ein attraktives Exponat war ein Roboter als Leihgabe der Hochschule der Medien, der sich mit Hilfe einer Solarzelle und eines von der Hochschule und dem ZSW gemeinsam entwickelten Algorithmus des maschinellen Lernens selbständig auf eine Lichtquelle zubewegen kann.

#### // Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstoff waren die entscheidenden Themen der UECT

Das ZSW veranstaltete die alle zwei Jahre stattfindende Tagung "Ulm ElectroChemical Talks" (UECT) unter dem Motto "Next Generation Electrochemical Energy Technologies". Rund 50 internationale Experten präsentierten neueste Erkenntnisse zu Lithium-Ionen-Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstoff im Kongresszentrum in Ulm. Mit über 320 Teilnehmern aus der Forschung sowie der Automobil- und Zulieferindustrie aus 21 Ländern und über 120 Posterbeiträgen war die 14. UECT damit die bisher größte Konferenz in ihrer Geschichte.

#### // Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist nicht zuletzt aufgrund der attraktiven Themen des Instituts weiterhin erfolgreich. Im Jahr 2014 wurde insgesamt 1.717 Mal über das ZSW berichtet – das sind die meisten Presseergebnisse seit Beginn der Zählung im Jahr 2006. Wie in den vergangenen Jahren war das Institut mehrmals in den wichtigsten regionalen und überregionalen Leitmedien wie z.B. Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Wirtschaftswoche, Stuttgarter Zeitung, Die Welt, SWR, Focus, Photon usw. vertreten.

Die quantitativ beste Resonanz in den Medien erzielten folgende ZSW-Pressemitteilungen:

- > Weltweit über 400.000 Elektroautos unterwegs
- > ZSW holt Wirkungsgrad-Weltrekord zurück nach Stuttgart
- > Weltweit einmaliges Batterieforschungszentrum eLaB in Ulm nun komplett
- > Neue Studie: Südländer führend bei Energiewende
- > Ulm jetzt Hochburg der Batterieforschung

#### // Intersolar Europe, Munich

ZSW's PV system engineers were also present at this year's Intersolar fair. An interesting exhibit was a robot, on loan from Stuttgart Media University, which can autonomously move towards a light source using a solar cell and a machine learning algorithm jointly developed by the university and ZSW.

#### // Batteries, fuel cells and hydrogen were the key topics of UECT

ZSW hosted the bi-annual conference "Ulm Electrochemical Talks" UECT under the motto "Next Generation Electrochemical Energy Technologies". Some 50 international experts presented the latest findings on lithium-ion batteries, fuel cells and hydrogen at the convention centre in Ulm. With over 320 participants from research and the automotive and supplying industries from 21 countries, and over 120 poster contributions, the 14th UECT was the biggest

#### // Media relations

Not least because of the attractive issues dealt with by the institute, ZSW has been able to continue its successful public relations work. In 2014, ZSW was reported about 1,717 times – the most ever press results since counting started in 2006. As in previous years, the institute was repeatedly mentioned in major regional and national mainstream media outlets such as Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Wirtschaftswoche, Stuttgarter Zeitung, Die Welt, SWR, Focus, Photon, etc.

From a quantitative point of view, the best received ZSW press reports were:

- > More than 400,000 electric vehicles on the road worldwide
- > ZSW brings efficiency world record back home to Stuttgart
- > Unique battery research centre Ulm eLaB now complete
- > New study: Southern Germany leads energy transition
- > Ulm is now a stronghold of battery research



# // Finanzielle Entwicklung Financial development



#### // Einnahmen – Ausgaben

Das Einnahmevolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 48,0 Mio. Euro und damit deutlich über dem Wert des Vorjahres. Wesentliche Ursache waren dafür hohe Einnahmen aus öffentlichen Zuwendungen für den Aufbau der Forschungsplattform für Lithium-Ionen-Zellen in Ulm.

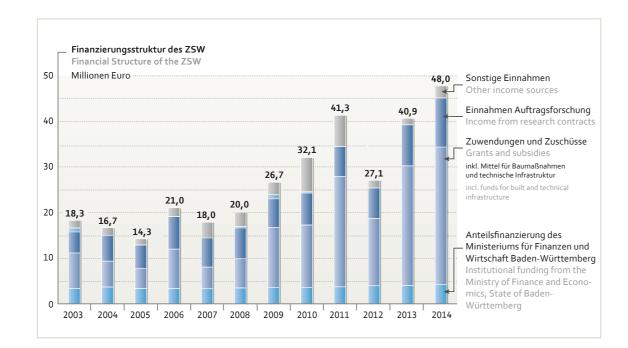
Das ZSW konnte sich international als eine der führenden Forschungseinrichtungen für Batterietechnologien etablieren und steigende Erträge aus der Auftragsforschung und aus öffentlichen Forschungszuwendungen generieren. Die Einnahmen aus der Auftragsforschung erreichten mit 10,8 Mio Euro einen neuen Höchststand und lagen mit + 20 % deutlich über dem Vorjahreswert. Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2014 um 0,1 Mio. auf 4,2 Mio. Euro.

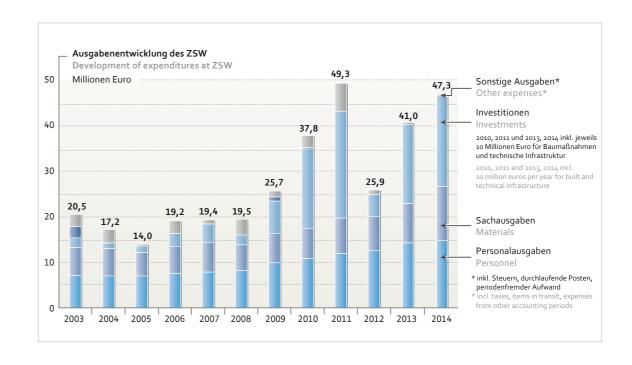
#### // Revenue – expenditure

In the past year, the income volume from normal business activities was 48.0 million euros 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 platform 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 the contract research reached a new record of 10.8 million euros and, with an increase of +20%, was therefore considerably greater than the previous year's value. The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased in 2014 by 0.1 million to 4.2 million euros.

Das korrespondierende Ausgabenvolumen erhöhte sich gegenüber dem Vorjahr auf 47,3 Mio. Euro, im Wesentlichen durch die Erhöhung der Investitionsausgaben für den Aufbau der Forschungsplattform für Lithium-Ionen-Zellen. Die Personalausgaben stiegen trotz des leichten Rückgangs beim Personal aufgrund einer Tariferhöhung. The corresponding expenditure volume increased relative to the previous year to 47.3 million euros, which was mainly due to an increase in the investments spent on constructing the research platform for lithium-ion cells. Personnel expenditure rose despite a slight decrease in the workforce as a result of collectively bargained pay increases.





 $r^{6}$ 

# // Personalentwicklung Staff Development





#### // Personalentwicklung

Im abgelaufenen Wirtschaftsjahr hat sich die Personalentwicklung konsolidiert. Die Mitarbeiterkapazität erreichte zum 31. Dezember 207 Vollzeitstellen. Das entspricht 226 Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen, 5 weniger gegenüber 2013.

Dennoch ist das ZSW mit seinen interessanten, zukunftsgerichteten Themenfeldern und der hervorragenden Infrastruktur sowie den vielfältigen Entwicklungsperspektiven für alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nach wie vor ein sehr attraktiver Arbeitgeber.

Erfreulich ist die Tatsache, dass im Berichtszeitraum 66 Frauen am Institut beschäftigt waren. Dies entspricht einem Frauenanteil von knapp 30 %. Damit hat das ZSW die von der Bundesregierung erst kürzlich beschlossene Frauenquote, auf freiwilliger Basis, schon jetzt erfüllt.

Zum Jahresende waren 20 Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen mit ausländischer Staatsangehörigkeit am Institut tätig, das ist nahezu jeder 10 Beschäftigte.

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

Das Institut bildete 2014 drei Auszubildende aus. In der mechanischen Werkstatt Stuttgart werden zwei Auszubildende zum Industriemechaniker und in der Verwaltung eine Kauffrau für Büromanagement ausgebildet.

#### // Staff development

In the previous fiscal year, the staff development has been consolidated. By 31 December, the staff capacity reached 207 full-time positions. This corresponds to 226 employees, 5 less than in 2013.

ZSW with its interesting, forward-looking topics, excellent infrastructure and numerous development opportunities remains a very attractive employer, however.

A fortunate fact is that 66 women were employed at the institute in the reporting period. This corresponds to a percentage of about 30%. This means that ZSW has already voluntarily met the women's quota law recently passed by the German Federal Government.

At the end of the year, 20 staff members with foreign citizenships were employed at the institute, which is almost every 10<sup>th</sup> employee.

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

The institute trained three apprentices in 2014. Two apprentices are training to become industrial mechanics at the mechanical workshop in Stuttgart, and the administration department is training a clerk for office management.

Im Berichtszeitraum fertigten am Institut 20 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertationen an.

Mit einem Anteil von 81 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität unverändert hoch.

Neben den nach dem Tarifvertrag der Länder beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sind am ZSW knapp 70 Studierende und Praktikanten beschäftigt. Ein Drittel davon hat ausländischen Wurzeln.

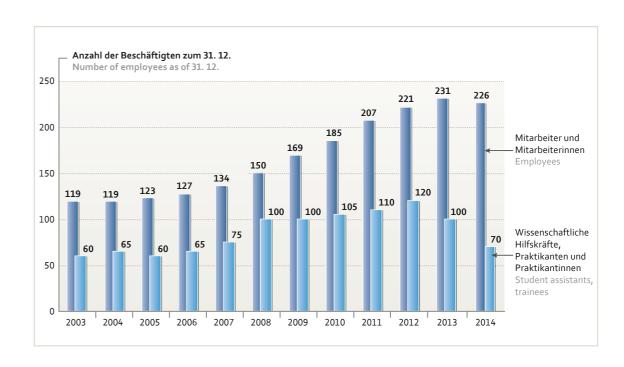
Von besonderer Bedeutung sind die Vernetzung mit Hochschuleinrichtungen und die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten.

In the year under review, 20 PhD students worked on their theses at the institute.

With 81% of all staff active in the scientific and technical area, a high level of productivity is still being achieved.

About 70 students and trainees are employed at ZSW in addition to the staff employed under the collective labour agreement of the federal states, one third of which have foreign roots.

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.



# // Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications



#### // Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften

Publications in Books and Journals

/ Baten T. (EEFA), Buttermann H.-G. (EEFA), Nieder T.; **Gesamtbilanz der Kraft-Wärme-Kopplung 2003 bis 2012**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen,
64. Jq. (2014) Heft 5

/ Bauer A., Hanisch J., Ahlswede E.; An effective single solar cell equivalent circuit model for two or more solar cells connected in series; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 4, No. 1, 340-347, Jan. 2014

/ Brellochs J.; Experimentelle Untersuchung und Prozess-Simulation der AER-Biomassevergasung zur Erzeugung eines regenerativen Erdgassubstitutes; Dissertation, Universität Stuttgart, Göttingen, 2014

/ Eswara Moorthy S.K. (CRP Lippmann), Balasubramanian P. (Univ. Ulm), van Mierlo W. (Univ. Ulm), Bernhard J. (Univ. Ulm), Marinaro M., Wohlfahrt-Mehrens M., Jörissen L., Kaiser U. (Univ. Ulm); An in-situ SEM-FIB based method for contrast enhancement and tomographic reconstruction for structural quantification of porous carbon electrodes; Microscopy and Microanalysis 20 (2014) 1576-1580

/ Frick V., Brellochs J., Specht M.; Application of ternary diagrams in the design of methanation systems; Fuel Processing Technology 118 (2014) S. 156-160

/ Hess S., Arkhipova M. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M., Maas G. (Univ. Ulm), Wachtler M.; Synthesis and characterisation of new guanidinium-based ionic liquids as possible electrolytes in lithium-ion batteries; Journal of the Electrochemical Society, 161 (5) A1-A9 (2014)

/ Höfling H., Jachmann H., Capota M.; **Der Bedarf für Speicherung im Stromsystem der Zukunft**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64. Jg. (2014), Heft 6

/ Jackson P., Hariskos D., Würz R., Wischmann W., Powalla M.; Compositional investigation of potassium doped Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with efficiencies up to 20.8%; Physica Status Solidi (RRL 8) No. 3 (2014) 219-222

/ Kienzlen V. (KEA), Böhnisch H. (KEA), Bieber H. (KEA), Bürger V. (Öko-Institut), Nast M. (DLR), Pehnt M. (IFEU), Schmidt M., Leprich U. (IZES), Schulz W. (BEI); **Die Bedeutung von Wärmenetzen für die Energiewende**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64. Jg. (2014) Heft 11

/ Kiowski O., Witte W., Hetterich M. (KIT), Powalla M.; Critical points in the band structure of absorber and buffer layers of CuIn<sub>1-X</sub>Ga<sub>X</sub>Se<sub>2</sub> solar cells by electroreflectance spectroscopy; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 4, No. 1, 285-290, Jan. 2014 (Proc. of the 39<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Tampa, 16-21 June 2013)

/ Köntje M., Memm M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; Substituted transition metal phospho olivines LiMM'PO<sub>4</sub> (M = Mn, M' = Fe, Co, Mg):
Optimisation routes for LiMnPO<sub>4</sub>; Progress in Solid State Chemistry 42
(2014) 106-117

/ Lämmle A., Würz R., Schwarz T. (MPIE), Cojocaru-Mirédin O. (MPIE), Choi P.-P. (MPIE), Powalla M.; Investigation of the diffusion behavior of sodium in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> layers; Journal of Applied Physics 115, 154501 (2014)

/ Li J., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; Sequential Monte Carlo filter for state estimation of LiFePO<sub>4</sub> batteries based on an online updated model; Journal of Power Sources 247 (2014) 156-162

/ Löschel A. (Univ. Münster), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F., Ziesing H.-J. (AGEB); Stellungnahme zum ersten Fortschrittsbericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2013; Bericht der Expertenkommission zum Monitoring-Prozess "Energie der Zukunft", Berlin, Münster, Stuttgart, Nov. 2014

/ Mack F. (HIU), Klages M., Scholta J., Jörissen L., Morawietz T. (HS Esslingen), Hiesgen R. (HS Esslingen), Kramer D. (HIU), Zeis R. (HIU); Morphology studies on high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell electrodes; Journal of Power Sources 255 (2014) 431-438

/ Musiol F., Nieder T., Rüther T., Bickel B.; Gemischte Energiewende-Bilanz 2013: Erneuerbare mit neuem Rekordergebnis bei gedämpftem Aufwärtstrend; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64. Jg. (2014) Heft 11

/ Petzl M. (HIU), Danzer M.; Nondestructive detection, characterization and quantification of lithium plating in commercial lithium-ion batteries; Journal of Power Sources 254 (2014) 80-87

/ 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., Blásquez-Sánchez D., Klugius I., Wischmann W.; CIGS cells and modules with high efficiency on glass and flexible substrates; IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 4, No. 1, 440-446, Jan. 2014 (Proc. of the 39th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Tampa, 16–21 June 2013)

/ Sehnke F., Zhao T. (Tokyo Tech); Efficient baseline-free sampling in parameter exploring policy gradients: Super symmetric PGPE; Springer Series in Bio/Neuroinformatics "Artificial Neural Networks – Methods and Applications", 2014

/ Senkpiel C. (ISE), Harmann N. (ISE), Taumann M., Schlegl T. (ISE); Wie gestaltet sich der Weg zu einer erneuerbaren Stromversorgung in Deutschland – Ein investorenbasierter Ansatz; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64. Jg. (2014) Heft 5 / Steiert S., Brellochs J., Specht M.; b2g – Innovative Erzeugung von gasförmigen Brennstoffen aus Biomasse; Energie Wasser Praxis, Januar 2014

/ Tran H. Y., Täubert C., Wohlfahrt-Mehrens M.; Influence of the technical process parameters on structural, mechanical and electrochemical properties of LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.15</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub> based electrodes – A review; Progress in Solid State Chemistry 42 (2014) 118-127

/ Waldmann T., Gorse S. (HS Aalen), Samtleben T. (HS Aalen/Matworks), Schneider G. (HS Aalen), Knoblauch V. (HS Aalen), Wohlfahrt-Mehrens M.; A mechanical ageing mechanism in lithium-ion batteries; Journal of the Electrochemical Society, 161 A1742-A1747 (2014)

/ Waldmann T., Wilka M., Kasper M., Fleischhammer M., Wohlfahrt-Mehrens M.; Temperature dependent ageing mechanisms in lithium-ion batteries — A post-mortem study; Journal of Power Sources 262 (2014) 129-135

/ Wessendorf C., Schulz G. (Univ. Ulm), Mishra A. (Univ. Ulm), Kar P. (Univ. Ulm), Ata I. (Univ. Ulm), Weidelener M. (Univ. Ulm), Urdanpilleta M. (UPV/EHU), Hanisch J., Mena-Osteritz E. (Univ. Ulm), Lindén M. (Univ. Ulm), Ahlswede E., Bäuerle P. (Univ. Ulm); Efficiency improvement of solution-processed dithienopyrrole-based A-D-A oligothiophene bulk-heterojunction solar cells by solvent vapor annealing; Advanced Energy Materials 2014, 1400266

/ Würz R., Eicke A., Kessler F., Pianezzi F. (EMPA); Influence of iron on the performance of CIGS thin-film solar cells; Solar Energy Materials and Solar Cells 130 (2014) 107-117

#### // Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

/ Axmann P., Gabrielli G., Fleischhammer M., Theil S., Wachtler M., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Lithium ion cells with high voltage cathode materials**; International Conference on Ionic Liquids for Electrochemical Devices – ILED-4, Rome, 28–30 May 2014

/ Axmann P., Gabrielli G., Wilka M., Fleischhammer M., Weinberger M., Theil S., Wohlfahrt-Mehrens M.; High voltage cathode materials for lithium ion batteries – From materials research to complete cells; 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2014), Quarzazate, 17-19 Oct. 2014

/ Binder J., Müller D., Pietruschka D. (HFT Stuttgart); **Dezentrale PV-Systeme: Wirtschaftlichkeit der Kombination von PV-Eigenverbrauch mit angebotsabhängigem Windstromtarif**; Tagungsband 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 12.-14.3.2014, S. 168-169

/ Brellochs J., Schnepf J., Marquard-Möllenstedt T., Steiert S., Sichler P., Dürrbeck M., Specht M.; Gegenüberstellung von Wirbelschichtbett-materialien für die allotherme Wasserdampfvergasung von Biomasse im Zweibettwirbelschichtprozess; DGMK-Tagung "Konversion von Biomassen", Rotenburg a. d. F., 12.-14.5.2014

/ Clark J.S., Wilhelm F., Messerschmidt M., Enz S., Scholta J.; CFD simulation of mass transport processes in the gas diffusion layer of a PEMFC; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014

/ Fleischhammer M., Bisle G., Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; Influence of ageing on the safety of Li-ion batteries; 2nd International Conference Automotive Battery Safety Summit, Berlin, 1–3 Dec. 2014

/ Geyer D., Lechner P., Schanz O.; Unerwartete Auswirkung der Reinigung von Dünnschicht-Solarmodulen; Tagungsband 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 12.-14.3.2014, S. 119-120

/ Günther C., Bauer M., Danzer M.; Aging of lithium-ion batteries in vehicle-to-grid applications; 14<sup>th</sup> Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014

/ Hanisch J., Wahl T., Wessendorf C., Ahlswede E.; Efficient polymer tandem modules and solar cells by doctor blading; E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, 26–30 May 2014

/ Hariskos D., Paetel S., Witte W., Bürkert L., Oertel M., Wischmann W., Powalla M.; **Passivation of interface defects in CIGS-based thin-film solar cells**; 29th EU-PVSEC, Amsterdam, 22–26 Sept. 2014

#### // Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications



- / Haußmann J., Bergbreiter C., Ender M., Markötter H., Arlt T. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Determination of the water saturation of porous media for improved fuel cell simulations by means of synchrotron tomography**; Sixth Joint BERII and BESSY II User Meeting 2014, Berlin, 3–5 Dec. 2014
- / Haußmann J., Seidenberger K., Markötter H. (HZB), Wilhelm F., Manke I. (HZB), Scholta J.; Synchrotron tomography analysis and Monte Carlo simulation of water transport paths in gas diffusion media; 97th Canadian Chemistry Conference and Exhibition (CSC 2014), Vancouver, 1–5 June 2014
- / Kermani M. (Univ. of Technology Tehran), Scholta J.; Influences of a more satisfactory catalyst layer boundary conditions in the design of PEM fuel cell flow fields; 14<sup>th</sup> Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- / Kiowski O., Witte W., Bauer A., Sperber D. (KIT), Powalla M.; Electroreflectance spectroscopy on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with CdS and Zn(O,S) buffer layers; E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, 26–30 May 2014
- / Klages M., Scholta J.; Accelerated stress testing of low temperature PEM fuel cell rainbow stack including 20 cells; 4th CARISMA International Conference 2014, Kapstadt, 1–3 Dec. 2014
- / Klee Barillas J., Li J., Günther C., Danzer M.; A comparative study and validation of state estimation algorithms for Li-ion batteries in battery management systems; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- /Lämmle A., Würz R., Powalla M.; Investigation of the effect of potassium on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> layers and solar cells; E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, 26 and May 2014
- / Lechner P., Geyer D., Schanz O., Stellbogen D.; PID: Korrelation von Laborund Feldmessungen; Tagungsband 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 12.-14.3.2014, S. 152-153
- / Lechner P., Hummel S., Geyer D.; Test method for a more realistic simulation of PID field stress; 29th EU-PVSEC, Amsterdam, 22–26 Sept. 2014, 2342-2345
- / Li J., Klee Barillas J., Günther C., Danzer M.; Variation based sequential Monte Carlo filter for state estimation of automotive battery packs; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- / Mack F. (HIU), Gogel V., Jörissen L., Kerres J. (Univ. Stuttgart); **New polymer** membranes for the Direct Methanol Fuel Cells operating at 130-150 °C; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014

- / Matthiss B., Binder J., Danzer M.; Model predictive control schemes for PV storage systems with grid voltage feedback to increase grid compatibility and self-consumption; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- / Matthiss B., Müller D., Binder J., Pietruschka D. (HFT Stuttgart); Model predictive control schemes for PV storage systems to increase grid compatibility and optimize energy costs; 29th EU-PVSEC, Amsterdam, 22–26 Sept. 2014, 3581-3586
- / Memm M., Hoffmann A., Wohlfahrt-Mehrens M.; Aqueous cathode preparation: Challenges and approaches; Workshop Green Lion, Helmholtz-Institute Ulm, 28–29 Oct. 2014
- / Meuser C., Memm M., Hoffmann A., Wohlfahrt Mehrens M.; Processing of aqueous based anode formulation for lithium-ion batteries; Kraftwerk Batterie 2014, Münster, 24.-26.3.2014
- / Powalla M., Bauer A., Hariskos D., Jackson P., Kiowski O., Friedlmeier T., Menner R., Paetel S., Witte W., Wischmann W., Würz R.; Thin-film solar cells and modules based on CIGS with high efficiency and manufacturability; 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-6), Kyoto. 23–27 Nov. 2014
- / Powalla M., Jackson P., Hariskos D., Paetel S., Witte W., Würz R., Lotter E., Menner R., Wischmann W.; CIGS thin-film solar cells with an improved efficiency of 20.8%; 29th EU-PVSEC, Amsterdam, 22–26 Sept. 2014
- / Schmidt M., Tänzer G. (IZES), Pregger T. (DLR), Merten F. (Wuppertal Institut); **Der Weg zur Mobilität der Zukunft**; FVEE-Jahrestagung 2014: Forschung für die Energiewende Phasenübergänge aktiv gestalten, Berlin, 6.-7.11.2014
- / Schnabel T., Abzieher T., Ahlswede E.; Vacuum-free preparation of Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> solar cells Comparison of SnSe<sub>2</sub> and elemental Se as chalcogen source; 40<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, 8–13 June 2014
- / Schott B., Williams C. Binder J., Ruf H. (HS Ulm), Heilscher G. (HS Ulm), Danzer M.; Techno-ökonomischer Vergleich von Batterietechnologien für Anwendungsfälle in Niederspannungsnetzen; Kraftwerk Batterie Lösungen für Automobil und Energieversorgung, Münster, 25.-26.3.2014
- / Secchiaroli M., Dsoke S., Fuchs B., Gucciardi E., Tian X., Marassi R., Wohlfahrt-Mehrens M.; A novel asymetric supercapacitor based on Li<sub>3</sub>V<sub>1.95</sub>Ni<sub>0.05</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> cathode and activated carbon anode; Supercapacitors Europe 2014, Berlin, 1–2 April 2014

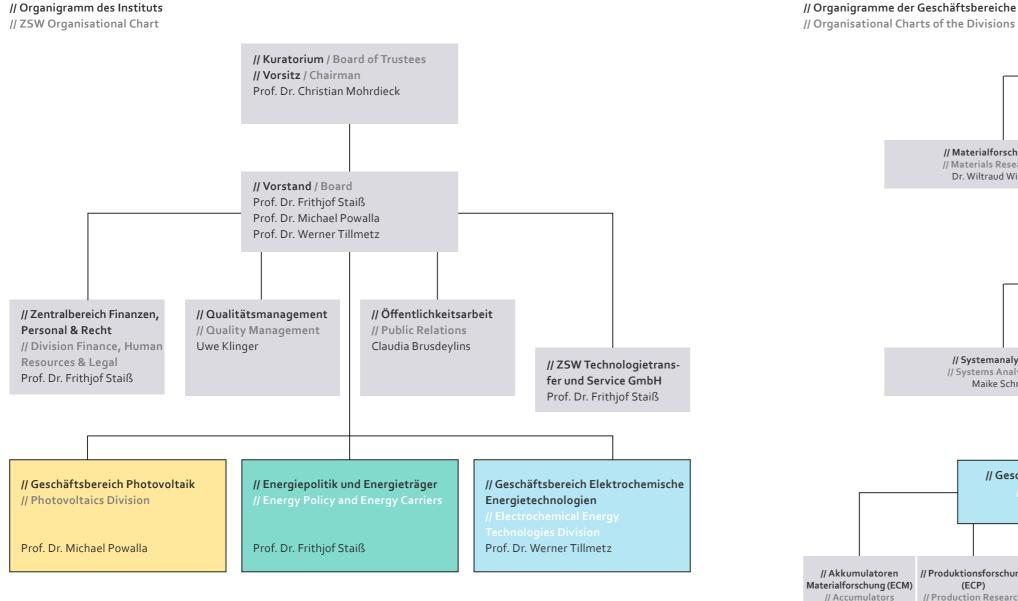
- / Spiering S., Paetel S., Kessler F., Igalson M. (WUT), AbdelMaxoud H. (WUT); Copper variation in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with indium sulphide buffer layer; E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, 26–30 May 2014
- / Staiß F.; Energiewende in Deutschland mehr Chancen als Risiken; 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 13.3.2014
- / Stumpp S., Wilhelm F., Messerschmidt M., Naderian M. (Univ. Ulm), Scholta J., Danzer M.; Investigation of contact and bulk thermal resistance of battery and fuel cell component materials; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- / Taumann M., Günther C., Danzer M.; Analysis of residual value of used electric batteries for second life applications by means of parameter variation; 14th Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- / Taumann M., Schott B., Günther C., Danzer M.; Techno-economic modeling of used electric vehicle batteries to estimate the residual value for second life applications; Kraftwerk Batterie Lösungen für Automobil und Energieversorgung, Münster, 25.-26.3.2014
- / Wachtler M., Tost A., Wilka M., Wohlfahrt-Mehrens M.; In-situ and ex-situ Raman study of NMC electrodes for Li-ion batteries; 7<sup>th</sup> German-Italian-Japanese Meeting of Electrochemists, Padua, 15–16 June 2014
- / Wachtler M., Tost A., Wilka M., Wohlfahrt-Mehrens M.; In-situ and ex-situ Raman study of NMC electrodes for Li-ion batteries; IBA 2014 Meeting of the International Battery Association, Brisbane, 3–7 March 2014
- / Waldmann T., Kasper M., Wilka M., Bisle G., Fleischhammer M., Wohlfahrt-Mehrens M.; Temperature dependent ageing mechanisms in lithium-ion batteries; Kraftwerk Batterie 2014, Münster, 24.-26.3.2014
- / Wieland F., Krug S., Muellner R., Danzer M., Brazel H.; **Swelling force** and cell thickness measurement during cycling of prismatic Li-ion cells; 14<sup>th</sup> Ulm Electrochemical Talks, Ulm, 23–26 June 2014
- / Wilka M., Axmann P., Hoffmann A., Fleischhammer M., Bisle G., Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; From materials research to complete cells influence of electrode design on performance, life time and safety in lithium ion batteries; IBA 2014 Meeting of the International Battery Association, Brisbane, 3–7 March 2014
- / Wilka M., Axmann P., Hoffmann A., Fleischhammer M., Bisle G., Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; Materials and electrode design for long life lithium-ion batteries; IMLB 2014 17th International Meeting on Lithium Batteries, Como, 10–14 June 2014

- / Witte W., Kiowski O., Menner R., Paetel S., Hariskos D., Powalla M.; Influence of solution-grown Zn(O,S) buffer layer thickness on the electrical properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells; E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, 26–30 May 2014
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; Lithium metal phosphates as cathode materials for Li-ion batteries Status and future perspectives; OREBA, Montreal, 25–28 May 2014
- / Wohlfahrt-Mehrens M., Axmann P., Memm M., Theil S., Fleischhammer M.; Development of lithium mixed metal phosphate cathode materials for Li-ion batteries; AABC 2014, Atlanta, 3–7 Feb. 2014
- / Wohlfahrt-Mehrens M., Gabrielli G., Axmann P.; Full cell development for 5V cathodes; 7th German-Italian-Japanese Meeting of Electrochemists, Padua, 15–16 June 2014
- / Würz R., Spiering S., Blau N., Leh S., Kessler F.; R2R fabrication of CIGS solar cells with In<sub>x</sub>S<sub>y</sub> buffer layers deposited by in-situ inline deposition A further process step towards the "all-in-one" concept; 29th EU-PVSEC, Amsterdam, 22–26 Sept. 2014
- / Würz R., Kessler F., Morgner H. (FEP), Saager S. (FEP); Influence of hollow cathode plasma activation on the growth of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films; E-MRS 2014 Spring Meeting, Lille, 26–30 May 2014

 $8_2$   $8_3$ 

# // Organigramme **Organisational Charts**

84



#### // Organisational Charts of the Divisions // Geschäftsbereich Photovoltaik // Photovoltaics Division Prof. Dr. Michael Powalla // Module Systeme Anwendungen (MSA) // Modules Systems Applications (MSA) // Materialforschung (MAT) // Materials Research (MAT) Dr. Wiltraud Wischmann Dr. Jann Binder // Energiepolitik und Energieträger Prof. Dr. Frithjof Staiß // Systemanalyse (SYS) // Regenerative Energieträger und Verfahren (REG) // Systems Analysis (SYS) // Renewable Fuels and Processes (REG) Maike Schmidt Dr. Michael Specht // Geschäftsbereich Elektrochemische Energietechnologien Prof. Dr. Werner Tillmetz // Akkumulatoren // Produktionsforschung // Akkumulatoren (ECA) // Brennstoffzellen // Brennstoffzellen // Brennstoffzellen Materialforschung (ECM) (ECP) // Accumulators (ECA) Grundlagen (ECG) Stacks (ECB) Systeme (ECS)

Dr. Harry Döring

// Fuel Cell Fundamentals

(ECG)

Dr. Ludwig Jörissen

// Fuel Cell Stacks (ECB)

Dr. Joachim Scholta

// Fuel Cell Systems (ECS)

Dr. Alexander Kabza

// Production Research

(ECP)

Wolfgang Brugger

Materials Research (ECM)

Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens

# // Standorte Locations





#### // Stuttgart



Industriestraße 6 70565 Stuttgart

#### // Widderstall



Widderstall 14 89188 Merklingen

#### Ansprechpartner / Contact Claudia Brusdeylins

Phone: +49(0)7117870-278

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

#### // Ulm



Helmholtzstraße 8 89081 Ulm

### // Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24 89081 Ulm

#### Ansprechpartner / Contact

Tiziana Bosa

Phone: +49(0)7319530-601 E-mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de

# // Abkürzungen **Abbreviations**

#### // Firmen, Institute, Institutionen

AGEB

**BMWi** 

AGGE-Stat

// Companies, Institutes, Institutions

Federal Ministry for Economic Affairs and Energy CRP Centre de Recherche Public Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, DGMK Erdgas und Kohle e. V. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. DLR **EEFA** Energy Environment Forecast Analysis GmbH & Co. KG ZSW Labor für Batterietechnologie eLaB European Materials Research Society E-MRS FEP Fraunhofer-Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik FPL Forschungsplattform für die industrielle Produktion von Lithium-Ionen-Zellen Hochschule für Technik HFT HIU Helmholtz-Institut Ulm HZB Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie International Energy Agency International Electrotechnical Commission IEC Institute of Electrical and Electronics Engineers IFFF IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme IZES Institut für Zukunfts-Energiesysteme Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg KEA Karlsruher Institut für Technologie KIT KLiB Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien Max-Planck-Institut für Eisenforschung UPV/EHU University of the Basque Country Warsaw University of Technology WUT

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen

Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien – Statistik

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/

#### // Technische Begriffe

Biomass to Gas

// Technical Terms

B<sub>2</sub>G

μ-CT

BEV Battery Electric Vehicle BPP Bipolarplatte/Bipolar Plate ΒZ Brennstoffzelle CFD Computational Fluid Dynamics Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid CIGS CNG Compressed Natural Gas Computer-Tomographie CT CV Cyclic Voltammetry Electrical/Instrumentation and Control F/I&C EE Erneuerbare Energien EEG Erneuerbare-Energien-Gesetz Electrochemical Impedance Spectroscopy EIS EV Electric Vehicle FK7 Forschungskennzeichen GDL Gas Diffusion Layer/Gasverteilerschicht HEV Hybrid Electric Vehicle Liquefied Petroleum/Propane Gas/Flüssiggas Membran-Elektroden-Einheit/Membrane Electrode Assembly MPC Modellprädiktive Steuerung MSR Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik Non-Dispersive Infrared nRMSE Normierter mittlerer quadratischer Fehler P<sub>2</sub>G® Power-to-Gas PFM Polymer-Elektrolyt-Membran PEMFC Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle Policy Gradients with Parameter-based Exploration PGPE PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle Potential-Induced Degradation/Potenzialinduzierte PID Degradation PtG Power-to-Gas Photovoltaik R<sub>2</sub>R Roll to roll, Rolle zu Rolle Renewable Energy RF SFM-FIB Scanning Electron Microscope – Focused Ion Beam SOC State of Charge – Ladungszustand STC Standard Test Conditions UECT Ulmer ElektroChemische Tage – Ulm ElectroChemical Talks UML Unified Modeling Language

Mikro-Computertomographie

// 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** 

EERA European Energy Research Alliance

**EFDS** Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e. V.

European Renewable Energy Centres Agency **EUREC** 

**EWEA** European Wind Energy Association GDCh Gesellschaft Deutscher Chemiker

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

Weiterbildungszentrum Ulm für Innovative Energietechnologien e. V. WBZU

Windcluster Baden-Württemberg Windcluster BW Windenergie Forschungsnetzwerk Süd WindForS **ZfES** Zentrum für Energieforschung Stuttgart

// Impressum // Imprint

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

Industriestraße 6 70565 Stuttgart

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

# // 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.