
// Ergebnisse
Results

ZSW 2017

// Inhalt

Contents

2	Vorwort / Foreword
4	Leitbild / Our Mission
6	Stiftung / Foundation
7	Mitglieder des Kuratoriums / Members of the Board of Trustees
8	Erfolge 2017 / Achievements 2017
14	Neubau in Stuttgart-Vaihingen / New building in Stuttgart-Vaihingen
16	Schwerpunktbericht / Focus Report Photovoltaik: Vielseitig. Nachhaltig. Wettbewerbsfähig. Photovoltaics: Versatile. Sustainable. Competitive.
32	Fachgebiete und Projekte / Departments and Research Projects
34	Systemanalyse / Systems Analysis
38	Photovoltaik: Materialforschung / Photovoltaics: Materials Research
42	Photovoltaik: Module Systeme Anwendungen / Photovoltaics: Modules Systems Applications
46	Regenerative Energieträger und Verfahren / Renewable Fuels and Processes
50	Akkumulatoren Materialforschung / Accumulators Materials Research
54	Produktionsforschung / Production Research
56	Akkumulatoren / Accumulators
60	Brennstoffzellen Grundlagen / Fuel Cell Fundamentals
64	Brennstoffzellen Stacks / Fuel Cell Stacks
68	Brennstoffzellen Systeme / Fuel Cell Systems
70	Öffentlichkeitsarbeit / Public Relations
78	Dokumentation / Documentation
80	Finanzielle Entwicklung / Financial Development
82	Personalentwicklung / Staff Development
84	Ausgewählte Veröffentlichungen / Selected Publications
88	Organigramme / Organisational Charts
90	Standorte / Locations
92	Abkürzungen / Abbreviations
93	Impressum / Imprint

// Copyright

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

// Copyright

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

// Vorwort

Die neue Bundesregierung bekennt sich in ihrem Koalitionsvertrag zum Klimaschutz und will unter anderem mit einem Klimaschutzgesetz das Erreichen der ambitionierten Ziele für Deutschland bis 2030 gewährleisten. Sie muss somit unter Beweis stellen, dass die Verminderung der Treibhausgasemissionen der letzten zweieinhalb Dekaden auch ohne Wiedervereinigungseffekt noch einmal in gleicher Höhe umgesetzt wird, und zwar in der Hälfte der Zeit. Dafür soll sich zum Beispiel der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch auf 65% verdoppeln. Jede zweite Kilowattstunde wird dann voraussichtlich aus den fluktuierenden Quellen Wind und Sonne erzeugt.

Vor diesem Hintergrund befasst sich der diesjährige Schwerpunktbericht mit dem Stand und den Perspektiven der Photovoltaik. Er zeigt, wie sich durch technologische Fortschritte die Kosten weiter reduzieren und durch neue Photovoltaikanwendungen sowie die intelligente Kopplung mit anderen Technologien Energiesysteme optimieren lassen. Für die experimentelle Umsetzung der Themen haben wir im Neubau am Standort Stuttgart inzwischen auch ein optimales räumliches Umfeld.

Der Jahresbericht präsentiert darüber hinaus weitere wissenschaftliche Highlights aus dem ZSW, etwa die Entwicklung eines neuen Elektrolyseurs oder von Verfahren für die Serienproduktion von Brennstoffzellenstacks und -komponenten gemeinsam mit der Automobilindustrie. Wir berichten von Hochleistungsbatteriezellen, die kommerzielle Doppelschichtkondensatoren sowohl hinsichtlich der Energie- als auch der Leistungsdichte übertreffen, und nicht zuletzt von der wissenschaftlichen Begleitung der Energiewende auf Bundes- und Landesebene.

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 Unterstützung und hervorragende Zusammenarbeit ebenso wie unseren Partnern aus Unternehmen, öffentlicher Forschungsförderung und Wissenschaft.

Allen Leserinnen und Lesern unseres Jahresberichts wünschen wir eine interessante Lektüre!

// Foreword

In the coalition agreement, the new German Federal Government commits itself to climate protection and aims to guarantee the achievement of Germany's ambitious goals by 2030 with a climate protection law. It must therefore prove that the same reduction in greenhouse gas emissions seen in the last two and a half decades will be achieved without any reunification effect and in half the time. For example, the share of renewable energy is to double to 65%. By then, every second kilowatt hour is expected to be generated with the fluctuating sources of wind and solar energy.

Against this background, this year's Focus Report deals with the current status and future prospects of photovoltaics. It illustrates how technological advances could further reduce costs, and how energy systems could be optimised through new photovoltaic applications and an intelligent coupling with other technologies. With the new building in Stuttgart, we now have an optimal spatial environment for experimental implementation of these topics.

The Annual Report also presents further scientific highlights from ZSW, such as the development of a new electrolyser and processes for the series production of fuel cell stacks and components in collaboration with the automotive industry. We report on high-performance battery cells that outperform commercial double-layer capacitors in terms of both energy and power density and, last but not least, on scientific support for the energy transition at the federal and state levels.

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 who, 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, Prof. 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

// 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 zentrale Elemente 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.

// Our Mission

// Energy is our future

Energy is crucial for prosperity and development. It drives innovation and is itself the subject of innovation. Renewable energy and increased energy efficiency are an intrinsic part of all economically, ecologically and socially sustainable energy concepts for the future. Our research and development covers photovoltaics, renewable energy carriers (such as hydrogen and methane gas as natural gas substitutes) and 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 competence.

// 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.

// Knowledge is our force

The issues we tackle are complicated. We deliver transparent, neutral information to the economic, political and social arenas. Our goal is to facilitate understanding and evaluation of new technologies and thus to win support for their implementation and help shape the energy supply of the future.

// Stiftung

// Foundation

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

Stiftungsauftrag:

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

Stifter des ZSW / The founders are

Institutionen und Forschungseinrichtungen / Institutions and research establishments

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

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

The goal of the foundation is:

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

Unternehmen / Commercial enterprises

- > Aare-Tessin AG für Elektrizität
- > Adolf Würth GmbH & Co. KG
- > Daimler AG
- > EnBW Energie Baden-Württemberg AG
- > Fichtner GmbH & Co. KG
- > IN-TEC GmbH
- > Martin Fritz Marketing Kommunikation GmbH
- > Messer GmbH
- > Robert Bosch GmbH
- > Schlaich Bergermann und Partner
- > Telefunken Electronic GmbH
- > Verband für Energie- und Wasserwirtschaft Baden-Württemberg e. V. (ehemals 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. Uli Lemmer
- > Prof. Dr.-Ing. Michael Weber

Ministerien und Organisationen / Ministries and Organizations

- > 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 Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg
- > Regierungsdirektor Dr. Christoph Rövekamp, Bundesministerium für Bildung und Forschung
- > Dr.-Ing. Klaus Bonhoff, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Universitäten / Universities

- > Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel, Rektor der Universität Stuttgart
- > Prof. Dr.-Ing. Michael Weber, Präsident der Universität Ulm

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

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

Fraunhofer-Gesellschaft

- > Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Wissenschaft / Science

- > Prof. Dr. Michael Auer, Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung
- > 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, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
- > Prof. Dr. Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie

Wirtschaft / Commercial enterprises

- > Dipl.-Ing. (FH), MBA Klaus Eder, Stadtwerke Ulm/Neu-Ulm
- > Dr. Axel Heinrich, Volkswagen AG
- > Dr. Winfried Hoffmann, Applied Solar Expertise
- > Dr. Jürgen Kirschner, Robert Bosch GmbH
- > Dr. Peter Lamp, BMW Group
- > Dieter Manz, Manz GmbH Management Consulting and Investment
- > 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, GWA Beteiligungs- und Management GmbH

//Erfolge 2017

// Achievements 2017



// Erfolge 2017

// Achievements 2017

„Energie mit Zukunft“ umschreibt das Ziel, effizienter mit Energie umzugehen und den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen, um dadurch zu einer nachhaltigen Energieversorgung beizutragen. Dieses Ziel verfolgt das ZSW, indem es neue und verbesserte Energietechnologien entwickelt und sie gemeinsam mit Industriepartnern marktreif macht.

Auch 2017 wurden wieder herausragende Ergebnisse in den Themenschwerpunkten erzielt.

“Energy with a future” describes the goal to spend energy efficiently, thereby increasing the share of renewable energy generation to contribute to a sustainable energy supply. ZSW is pursuing this goal by developing new and improved energy technologies and ensuring their transfer to the market.

In 2017, excellent results were achieved once again in the key areas.

// Bundesländervergleich Erneuerbare Energien 2017

Der Ausbau erneuerbarer Energien ist eine wesentliche Säule der Energiewende. Neben der Bundespolitik besitzen die Landesregierungen vielfältige Möglichkeiten, die weitere Entwicklung zu unterstützen. Vor diesem Hintergrund wurde 2017 durch das ZSW und das DIW Berlin im Auftrag und in Kooperation mit der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) zum fünften Mal ein Bundesländervergleich im Bereich erneuerbarer Energien durchgeführt. Die Analyse bewertet auf der Basis von 59 Indikatoren detailliert die politischen Anstrengungen und Erfolge der Länder bei der Nutzung erneuerbarer Energien sowie beim damit verbundenen technologischen und wirtschaftlichen Wandel. Die Ergebnisse unterscheiden sich zwischen den vier Indikatorengruppen teilweise stark, wobei jeweils unterschiedliche Länder die Spitzenpositionen belegen. In der Gesamtwertung führt 2017 erstmals Baden-Württemberg.

// Comparison of renewable energy development in German federal states in 2017

The expansion of renewable energy use is an important pillar of the energy transition. In addition to federal policy, the state governments can draw upon a wide range of options to spur further development. Against this backdrop, ZSW and DIW Berlin carried out a comparison of the federal states in the area of renewable energy for the fifth time in 2017 – on behalf of and in cooperation with the Renewable Energy Agency (AEE). Based on 59 indicators, the analysis assesses in detail the federal states’ political efforts and successes in utilising renewable energies and the associated technological and economic changes. The results vary widely between the four indicator groups, with different states taking the lead. Baden-Württemberg leads the overall ranking for the first time in 2017.

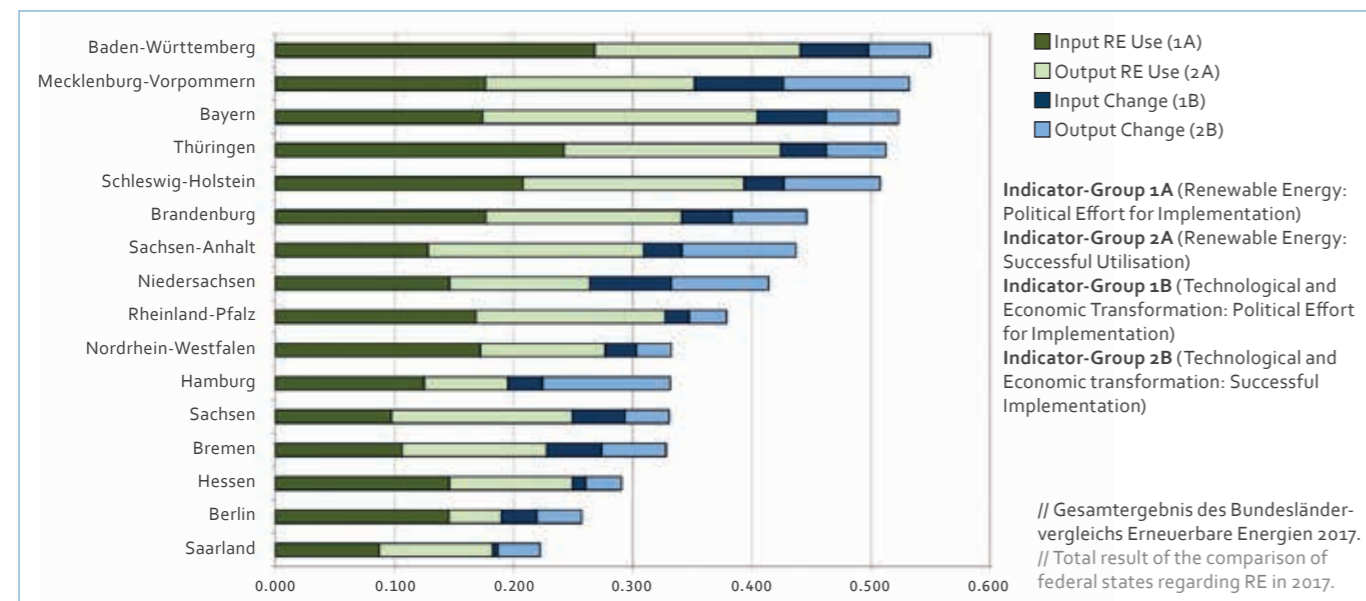


Foto: Manz AG

// Dieter Manz, Manz AG, nach der Vertragsunterzeichnung u. a. mit Vertretern von Shenhua und Shanghai Electric.
 // Dieter Manz, Manz AG, after signing the contract with representatives of Shenhua and Shanghai Electric.

// CIGS-Technologie erobert den internationalen Markt

Zwei führende chinesische Energieunternehmen, die Shanghai Electric und die China Energy Group (ehemals Shenhua Group), sind Anfang 2017 in die Produktion der CIGS-Technologie des ZSW und seines Industriepartners Manz AG eingestiegen. Manz errichtet für ein Joint Venture mit den chinesischen Partner zunächst eine Fabrik für CIGS-Dünnschichtsolarmodule mit einer jährlichen Produktionskapazität von 306 Megawatt (MW). Hinzu kommt eine Fertigungsanlage für die Forschung und Entwicklung mit 4,4 MW. Nach der Vereinbarung für China sind Gigawatt-Kapazitäten bei der Produktion sowie der Einstieg von Investoren auch in anderen Märkten zu erwarten. Die chinesischen Partner wollen mit ihren Investitionen den Klimaschutz vorantreiben und die Solarmodule aus den zu bauenden Fabriken für den eigenen Strombedarf nutzen. Die Ratifizierung des UN-Klimaschutzabkommens, dem China beigetreten ist, und die Umweltprobleme im Reich der Mitte bieten eine wichtige Motivation für den Umstieg auf erneuerbare Energien.

// CIGS technology conquers the international market

At the beginning of 2017, two leading Chinese energy companies, Shanghai Electric and China Energy Group (formerly Shenhua Group), invested in the CIGS technology as developed by ZSW and its industrial partner Manz AG. Manz is building a factory for CIGS thin-film solar modules with an annual production capacity of 306 megawatts (MW) for a joint venture between the Chinese partners. It will be supplemented by a 4,4-MW production plant for research and development. Gigawatt production capacities and investors also entering other markets are expected following the agreement for China. With their investments, the Chinese partners aim to promote climate protection and use the solar modules from the factories which will be built to meet their own power demand. The ratification of the UN climate protection agreement, which China has signed, and the environmental problems in China provide an important incentive for switching to renewable energy sources.

// Neue Inline-Beschichtungsanlage für Dünnschichtsolarmodule

Zeitgleich zum Umzug in den ZSW-Neubau in Stuttgart wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie eine neue Beschichtungsanlage für CIGS-Dünnschichtsolarmodule aufgebaut, die viele Verbesserungen bringt. In der 13 m langen Anlage werden bis zu 30 x 30 cm² große Substrate im produktionsrelevanten Durchlaufverfahren mittels Ko-Verdampfung der Elemente Kupfer, Indium, Gallium und Selen mit dem Licht absorbierenden Material Cu(In,Ga)Se₂ beschichtet. Die ca. 2 µm dünne Schicht kann in konstant hoher Qualität innerhalb weniger Minuten aufgebracht werden. Der Beschichtungsbereich inklusive der Verdampferquellen wurde auf der Grundlage des Know-hows des ZSW konstruiert und aufgebaut. Der Aufbau mit fünf austauschbaren Verdampferbereichen ermöglicht mehr Flexibilität in der Ausgestaltung und somit eine Optimierung des Beschichtungsprozesses.

// New inline coating plant for thin-film solar modules

Synchronised with the relocation to the new ZSW building in Stuttgart, a highly improved new coating plant for CIGS thin-film solar modules was built using funds from the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. In the 13-m long plant, substrates up to 30 x 30 cm² in size are coated with the light-absorbing material Cu(In, Ga)Se₂ in the production-relevant inline process by co-evaporating the elements copper, indium, gallium and selenium. The approx. 2-µm-thin layer can be applied with consistently high quality in a matter of minutes. The coating section, including the evaporator sources, was designed and built on the basis of ZSW's expertise. The setup with five interchangeable evaporator sections permits more flexibility in design and therefore an optimisation of the coating process.



// Neue Inline-Beschichtungsanlage für CIGS-Dünnschichtsolarmodule auf Glas im Format 30 x 30 cm².
 // New inline coating plant for CIGS thin-film solar modules in sizes up to 30 x 30 cm².



// Elektrolyse-Versuchsbetrieb zur Charakterisierung von drucklosen Elektrolyseblöcken bis 10 kW und von Systemkomponenten.
// Electrolysis test operation for the characterisation of unpressurized electrolysis blocks up to 10 kW and of system components.



// Mit dem vom Bundesverkehrsministerium durch die NOW GmbH geförderten Projekt „HyLab“ werden deutschlandweit Wasserstoffproben von der Erzeugung bis zur Abgabe an Tankstellen analysiert.
// With the “HyLab” project funded by the Federal Ministry of Transport through NOW GmbH, hydrogen samples from production to delivery to filling stations are analysed throughout Germany.

// ecoPtG – erfolgreiche Inbetriebnahme eines Low-Cost-Elektrolyseurs für die 100-kW-Leistungsklasse

Ziel des ecoPtG-Projekts ist die Entwicklung einer effizienten und wirtschaftlichen Wasser-Elektrolyse für die Anwendung des erzeugten Wasserstoffs im Mobilitäts- und Off-Grid-Bereich. Hierfür werden Möglichkeiten des Technologietransfers aus der Serienfertigung der Automobilindustrie zur Realisierung eines drucklosen, containerbasierten Low-Cost-Elektrolysesystems der 100-kW-Klasse angewendet. Das entwickelte Gesamtkonzept basiert auf vereinfachten Fertigungsverfahren und günstigen Materialien wie Kunststoff für die Zellrahmen. Im Jahr 2017 wurde am ZSW erfolgreich ein erster 10-kW-Prototyp in Betrieb genommen. Die ecoPtG-Elektrolyse zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus: kunststoffbasiertes Zellrahmen-/Elektrolyseblock-Design, Massenproduktion in Spritzgusstechnik, Elektrodenoberfläche von 1.500 cm², Zielkosten in der 100-kW-Klasse von < 1.000 €/kW_{el}, Energiebedarf von 4,3 kWh_{DC}/m³_{H₂} (400 mA/cm²).

// ecoPtG – successful commissioning of a low-cost electrolyser for the 100-kW power class

The aim of the ecoPtG project is to develop efficient and economical water electrolysis to generate hydrogen for use in the mobility and off-grid sectors. For this purpose, possibilities offered by technology transfer from series production in the automotive industry are used to produce a non-pressurised, container-based low-cost electrolysis system in the 100-kW class. The overall concept that was developed is based on a simplified manufacturing process and inexpensive materials such as plastic for the cell frames. In 2017, the first 10-kW prototype was successfully put into operation at ZSW. ecoPtG electrolysis is characterised by the following properties: plastic-based cell frame/electrolysis block design, mass production with injection moulding, electrode surface area of 1,500 cm² and target costs in the 100-kW class of < €1,000/kW_{el}, with an energy requirement of 4.3 kWh_{DC}/m³_{H₂} (400 mA/cm²).

// Verunreinigungen im Wasserstoff bestimmen

Wasserstoff als Kraftstoff kann Verunreinigungen enthalten, die schädlich für Brennstoffzellen sind. Die Grenzwerte sind im Qualitätsstandard ISO 14687-2 definiert. Mit dem Projekt „HyLaB“ sind erstmals aktuell zwei unabhängige Labore – am ZSW in Ulm und am ZBT in Duisburg – im Aufbau, um an vorhandenen und in Planung befindlichen H₂-Tankstellen die Einhaltung dieser Grenzwerte zu überprüfen. Im Projektverlauf wurden bisher geeignete Analysemethoden evaluiert und bewertet. Ferner wurde die vorhandene Analytik erweitert, neue beschafft und mit dem Aufbau der Infrastruktur begonnen. Zusätzlich wurde ein Probenahme-Konzept entwickelt und bereits mit internationalen Herstellern diskutiert. Die Arbeiten begleiten H₂-Probenahmen, die mit Analysen internationaler Labore verglichen werden.

// Identifying impurities in hydrogen

Hydrogen as a fuel can contain impurities that are harmful to fuel cells. The limit values are defined in the quality standard ISO 14687-2. With the “HyLaB” project, two independent laboratories are currently under construction for the first time – at ZSW in Ulm and ZBT in Duisburg – to verify compliance with these limits at existing and planned H₂ filling stations. In the course of the project, suitable analysis methods have been evaluated and assessed. The existing analytical equipment was expanded, new equipment was procured and the construction of the infrastructure begun. A sampling concept was developed and it has already been discussed with international manufacturers. The work is accompanied by H₂-sampling, which is compared with analyses carried out by a number of international laboratories.

// Zweite Generation alkalischer Hochleistungszellen

Doppelschichtkondensatoren (DLC) können kurzfristig hohe elektrische Leistungen bereitstellen. Gegenüber Akkus ist ihre Energiedichte bisher viel geringer. Das ZSW erforscht neue Materialien, die das besser können: Positive, nanostrukturierte Nickelhydroxid-Elektroden ermöglichten es, in der ersten Generation der alkalischen Hochleistungszelle Entladeraten von 1.150 C zu realisieren. Als negative Elektrode wurden kommerzielle Aktivkohlenstoffe eingesetzt. Jedoch erwies sich die Energiedichte dieser Zellen als vergleichbar mit kommerziellen DLC mit organischen Elektrolyten. Für die zweite Generation wurde Aktivkohlenstoff genutzt, der mit 150 mAh g⁻¹ die etwa dreifache spezifische Kapazität von kommerziellen Aktivkohlenstoffen aufweist. So konnten die Energiedichte der Hochleistungszelle auf knapp 10 Wh kg⁻¹ gesteigert und kommerzielle DLC hinsichtlich der Energie- und Leistungsdichte übertroffen werden.

// Second generation of alkaline high-performance cells

Double-layer capacitors (DLC) can supply large amounts of energy in short bursts. Compared to batteries, their energy density has been much lower up to now. ZSW is researching new materials with better performance: positive, nanostructured nickel hydroxide electrodes made it possible to achieve discharge rates of 1,150 C in the first generation of alkaline high-performance cells. Commercial activated carbon was used for the negative electrode. However, the energy density of these cells proved to be comparable to commercial DLC with organic electrolytes. For the second generation, activated carbon was used, which at 150 mAh g⁻¹ has approximately three times the specific capacity of commercial activated carbon. The energy density of the high-performance cell was increased to just under 10 Wh kg⁻¹, and the commercial DLC benchmark was surpassed in terms of energy and power density.

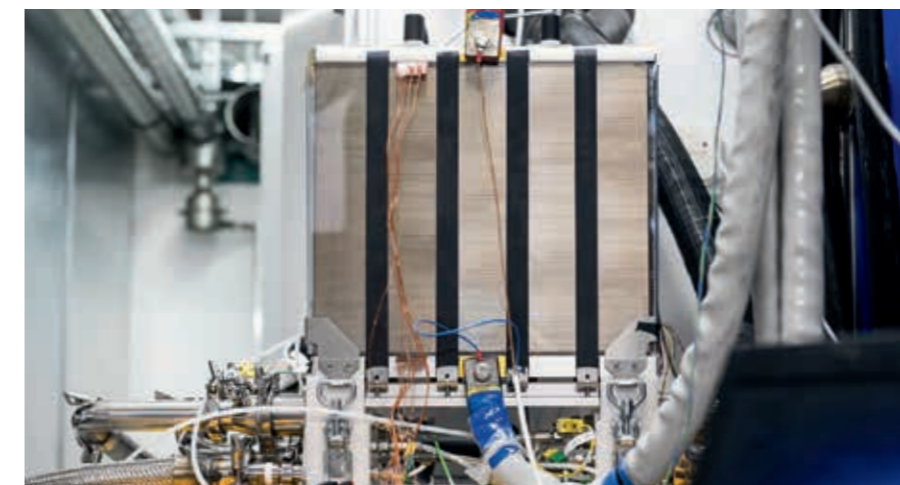
// Serienproduktion von Brennstoffzellen rückt näher

Im europäischen Verbundprojekts AutoStack-CORE (ASC) wurde ein PEM-Brennstoffzellenstack mit höchster Leistungsdichte entwickelt. Darauf aufbauend wird im Rahmen des vom Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzelle (NIP) geförderten Projekts AutoStack-Industrie (ASI) ein Verfahren zur Serienproduktion von Stacks und deren Komponenten entwickelt. Beteiligt sind vier Automobilhersteller, fünf Unternehmen der Zulieferindustrie und das ZSW. Als erster Meilenstein wurde eine Kernspezifikation für einen modularen Stack mit 270 Einzelzellen und einer Leistung von 85 kW verabschiedet. Durch Modulbauweise kann ein Leistungsbereich zwischen 50 und 150 kW abgedeckt werden. Entsprechend der Spezifikation werden die benötigten Komponenten wie Katalysatoren, Membran-Elektroden-Einheiten, Bipolarplatten etc. zu einem hohen Reifegrad weiterentwickelt und qualifiziert.

// Series production of fuel cells is drawing closer

The successful completion of the European joint project AutoStack-CORE resulted in the development of a PEM fuel cell stack with an extremely high power density. This development is taken to the next level in the AutoStack-Industrie (ASI) project and with the aim to develop a process for the serial production of stacks and their components within the framework of the National Innovation Programme for Hydrogen and Fuel Cell Technology (NIP). Four car manufacturers, five companies in the supply industry and ZSW are involved. The first milestone was the adoption of a core specification for a modular stack with 270 individual cells and an output of 85kW. Thanks to its modular design, the output range is between 50 and 150kW. All required components, such as catalysts, membrane-electrode units, bipolar plates and so on, are developed and tested according to the specification.

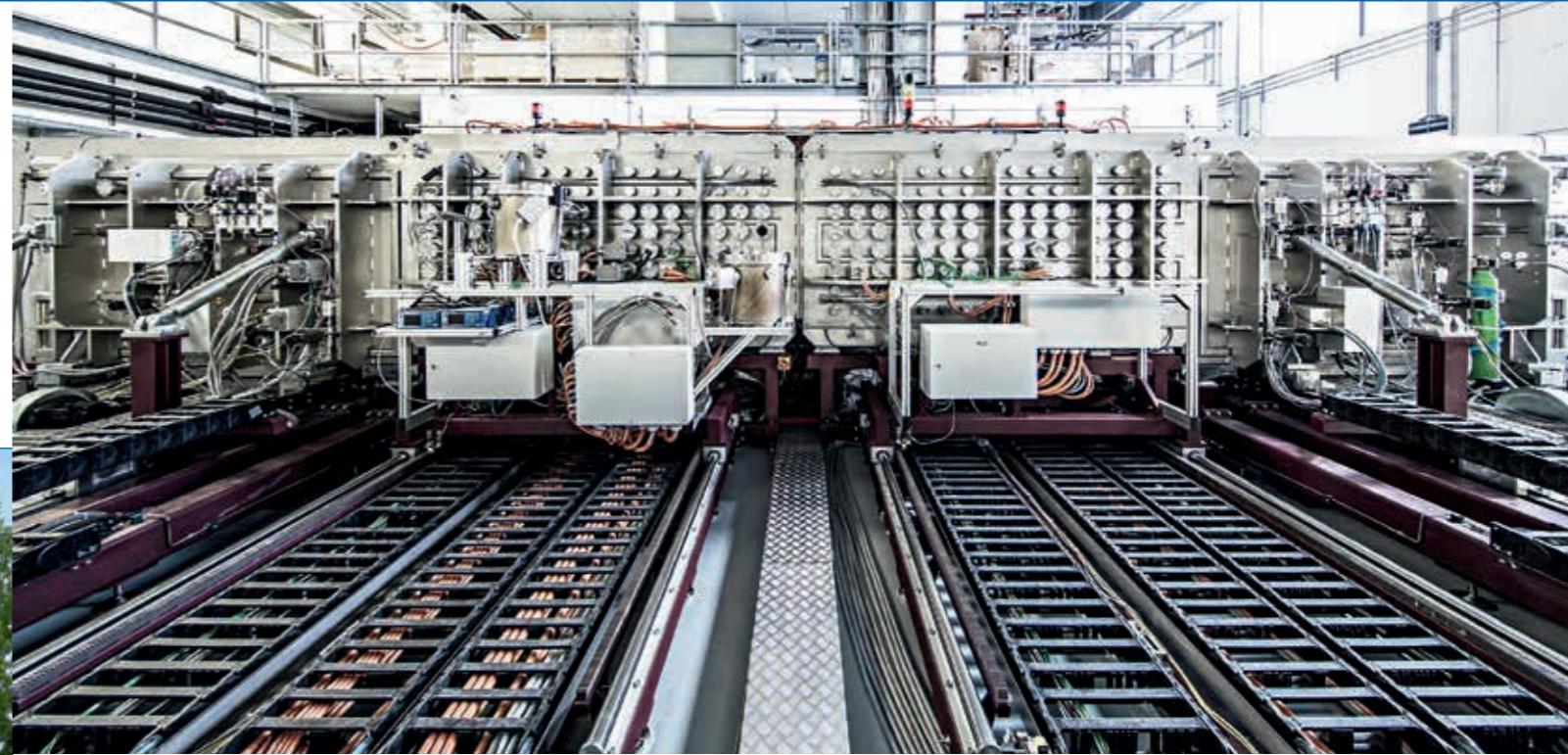
// Wasserstoffanalyse im ZSW-Labor.
// Hydrogen analysis in the ZSW laboratory.



// Der ASC-Brennstoffzellenstack dient als Funktionsmuster zu Beginn der Entwicklungsarbeiten von AutoStack-Industrie.
// The AutoStack-CORE fuel cell stack serves as a functional model at the beginning of the AutoStack-Industrie developments.

// Neubau in Stuttgart-Vaihingen

New building in Stuttgart-Vaihingen



32 Geothermiesonden: 50 % der Wärmeenergie sind regenerativ
geothermal probes: 50% of the heat energy is renewable

10.600 m² Gesamtnutzfläche (davon 8.000 m² für Büros und Labore)
of total usable floor area (including 8,000 m² for offices and laboratories)

4.248 m² Laborfläche
of laboratory space

110 Arbeitsplätze, Ausbau bis 135 möglich
work stations, expansion up to 135 possible

587 CIGS-Solarmodule mit 46,44 kW Nennleistung
CIGS solar modules with a rated output of 46.44 kW

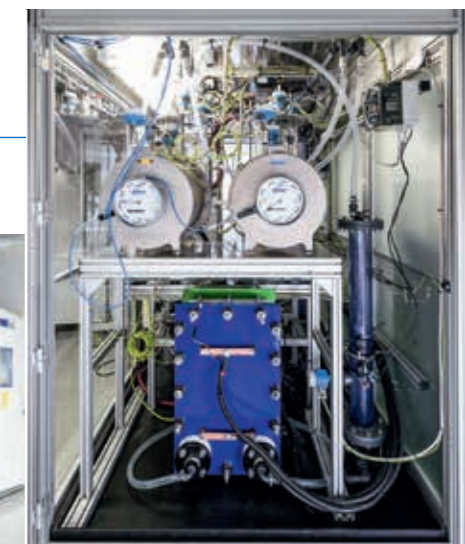
3,4 Megawatt elektrische Anschlussleistung
megawatts electrical connected load

Ende März 2017 konnten wir den Neubau unseres Forschungs- und Verwaltungsgebäudes in Stuttgart-Vaihingen beziehen. In den neuen Räumlichkeiten erhalten die Vernetzung von Menschen und Wissen, Transparenz und ein angenehmes Arbeitsklima eine neue Qualität. Hier wollen wir die besten Ideen für ein nachhaltiges Energiesystem entwickeln und umsetzen.

We moved into our new research and administration building in Stuttgart-Vaihingen at the end of March 2017. The networking of people and knowledge, transparency and a pleasant working atmosphere will all take on a new quality on the new premises. This is where we intend to develop and implement the best ideas for a sustainable energy system.

Wir danken allen Unterstützern unseres Neubauprojekts, insbesondere dem Kuratorium des ZSW, dem Land Baden-Württemberg, der Landeshauptstadt Stuttgart, den Architekturbüros Henning Larsen sowie Guggenberger & Ott, den beteiligten Planungs- und Handwerksunternehmen, allen anderen Unternehmen und Behörden und nicht zuletzt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ZSW, die mit vereinten Kräften an der Planung und Durchführung des Umzugs und der Inbetriebnahme der neuen Labore und Anlagen mitgewirkt haben.

We would like to thank everyone who supported our new building project, in particular the Board of Trustees of ZSW, the State of Baden-Württemberg, the state capital city of Stuttgart, the architectural offices Henning Larsen and Guggenberger & Ott, the planning and handicraft enterprises involved, all other companies and authorities and last but not least the employees of ZSW, who made a combined effort in planning and realising the relocation and commissioning of the new laboratories and facilities.





// Schwerpunktbericht

Photovoltaik: Vielseitig. Nachhaltig.
Wettbewerbsfähig.

// Focus Report

Photovoltaics: Versatile. Sustainable.
Competitive.

// Photovoltaik

Vielseitig. Nachhaltig. Wettbewerbsfähig.



Mit seiner Material- und Produktionsforschung für die Dünnschichtphotovoltaik, seinen Untersuchungen zur Zuverlässigkeit von Photovoltaik-Modulen und seinen Projekten zur Netzintegration von Solarstrom, aber auch mit seiner Politikberatung auf Landes- und Bundesebene leistet das ZSW einen Beitrag zum Erfolg der Energiewende. Dabei ist die Photovoltaik ein wesentlicher Grundpfeiler einer nachhaltigen Energieversorgung.

ZSW contributes to the success of the energy transition with its research into materials and production technology for thin-film photovoltaics, its studies on the reliability of photovoltaic modules and its projects for the grid integration of solar power, as well as its policy consulting at the state and federal level. Photovoltaics is a keystone of a sustainable energy supply system.

// Photovoltaics

Versatile. Sustainable. Competitive.

// Management Summary

- > Die Photovoltaik ist neben der Windenergie die zentrale Energietechnologie der Zukunft und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz.
- > Zum Erreichen der Klimaziele ist ein weltweiter Ausbau der Photovoltaik auf über 3.000 Gigawatt bis 2040 notwendig.
- > Der Ausbau in Deutschland muss durch politische Weichenstellungen beschleunigt werden. Dazu gehört unter anderem, die umfangreichen Potenziale auf und an Gebäuden in urbanen Räumen zu erschließen.
- > Die Photovoltaik ist heute bereits vielfach wettbewerbsfähig zu anderen Energieversorgungsoptionen. Über die technologische Entwicklung kann ein erhebliches weiteres Potenzial zur Kostensenkung erschlossen werden.
- > Aufgrund der gebrauchsnahen Strombereitstellung, auch für Wärme und Kälte in Gebäuden sowie für Elektrofahrzeuge, genießt die Photovoltaik eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung.
- > Die zeitliche und örtliche Fluktuation der Erträge aus der Photovoltaik lässt sich über den Mix mit der Windenergienutzung sowie über die Sektorenkopplung und Speichertechnologien heute besser ausgleichen als je zuvor. Damit ist die Photovoltaik sehr gut ins Energiesystem integrierbar.
- > Together with wind energy, photovoltaics is the central energy technology of the future, and it makes a significant contribution to climate protection.
- > In order to achieve climate targets, worldwide expansion of photovoltaics to more than 3,000 gigawatts by 2040 is needed.
- > The expansion in Germany needs to be accelerated by way of policy decisions. This includes, amongst other things, tapping the extensive potential of and on buildings in urban areas.
- > Photovoltaics is already competitive with other energy supply options. Considerable further potential for cost reduction can be tapped with technological developments.
- > Photovoltaics enjoys a high level of public acceptance due to its provision of power close to the point of use, including power for heating and cooling in buildings and for electric vehicles.
- > Fluctuations of photovoltaic yield in time and space can be more easily compensated for today than ever before in combination with wind energy use, sector coupling and storage technologies. This means that photovoltaics can be easily integrated into the energy system.





Vorteile der Solarstromerzeugung

Die Stromerzeugung mittels Photovoltaik (PV) stellt in Verbindung mit der Windenergienutzung einen zentralen Baustein für die Zukunft der Energieversorgung dar, nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Die direkte Umwandlung von Sonnenenergie in elektrischen Strom ist effizient, in der Anwendung denkbar einfach und skalierbar sowie emissionsfrei und langlebig. Die Herstellung von PV-Modulen wird großtechnisch gut beherrscht und ist dadurch kostengünstig.

Die Photovoltaik deckt durch ihre Modularität ein einzigartiges Anwendungsspektrum ab: von Milliwatt- bis zu Gigawatt-Anwendungen. Eine besondere Stärke ist die verbrauchsnahe Strombereitstellung, die vor Ort z. B. auch Teile der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden sowie das „Betanken“ von Elektrofahrzeugen übernehmen kann. Sie genießt deshalb eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung. Mit der Finanzierung und dem Betrieb von Dachanlagen durch den Gebäudeeigentümer oder lokale Zweckgemeinschaften entsteht eine Teilhabe großer Bevölkerungsteile an der Energiewende, finanziell und emotional.

In vielen Regionen der Welt ohne Elektrizitätsnetz können heute mit PV-Anlagen kleinteilige Inselnetze aufgebaut werden. Sie werden auch eingesetzt, um den Verbrauch von Treibstoff für Dieselgeneratoren zu verringern, der in entlegenen Gebieten oder auf Inseln oftmals nur zu hohen Kosten bereitgestellt werden kann.

Die Kosteneffizienz der Photovoltaik hat sich in den letzten Jahren durch eine beeindruckende Lernkurve entscheidend verbessert. Skaleneffekte haben sich auch durch die finanzielle Förderung von

Advantages of solar power production

Photovoltaic (PV) power generation, in combination with wind power, is a central building block for the future of energy supply, not only in Germany but worldwide. The direct conversion of solar energy into electricity is efficient, easy to realise and scalable, emission-free and durable. The production of PV modules is well controlled on an industrial scale and therefore cost-effective.

Due to its modularity, photovoltaics covers a unique range of applications: from milliwatt to gigawatt applications. A particular strength is that it supplies power close to consumers and can also take over portions of the heat and cold supply of buildings as well as “refuel” electric vehicles. This is why it enjoys a high level of public acceptance. Building owners and local special-purpose associations finance and operate roof systems, resulting in the participation of large sections of the population in the energy transition, both financially and emotionally.

Today, it is possible to build small isolated networks with PV systems in many regions of the world without a power grid. They are also used to lower the consumption of fuel for diesel generators, which can often only be provided at high cost in remote areas or on islands.

The cost efficiency of photovoltaics has improved considerably in recent years thanks to an impressive learning curve. Economies of scale have also been achieved through financial support for new production facilities in Asia and have led to a cost reduction of around 70% since 2011.

neuen Produktionsanlagen in Asien eingestellt und seit 2011 zu einer Kostenreduktion von rund 70% geführt. Die mittleren Systempreise in Deutschland liegen heute zwischen 860 €/kWp für Freiflächenanlagen und 1.360 €/kWp für kleine Dachanlagen. Dies führt zu Stromerzeugungskosten zwischen 5,5 ct/kWh für Freiflächen- und 12,5 ct/kWh für kleine Dachanlagen. Bei entsprechender geografischer Lage und Anlagengröße wird Photovoltaikstrom zur kostengünstigsten Stromerzeugungstechnologie überhaupt. So gewann die Photovoltaik im Jahr 2017 eine technologieoffene Ausschreibung in Chile mit Stromerzeugungskosten von 2,71 ct/kWh. Und dies ist kein Einzelfall.

Marktentwicklung in Deutschland und weltweit

In Deutschland liegt der Anteil der Solarenergie an der Netto-Stromerzeugung bei etwa 7%. Dies ist einer der höchsten Werte weltweit. Der Zubau lag im Jahr 2017 allerdings mit 1,7 GW deutlich unterhalb des mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz angestrebten Ausbaupfades von 2,5 GW pro Jahr. Die von der Bundesregierung aktuell geplanten Sonderausschreibungen in den nächsten beiden Jahren sind deshalb zu verstetigen, um die langfristigen Ziele für die regenerative Stromerzeugung insgesamt zu erreichen. In Baden-Württemberg soll dies u. a. durch die für 2018 bis 2020 geplante Solaroffensive des Landes unterstützt werden. Neben Hilfestellungen bei planerischen Aspekten geht es hierbei auch um eine verbesserte Information der Akteure insbesondere bzgl. der Rendite von Photovoltaikanlagen. Denn diese sind im Unterschied zur landläufigen Meinung nach wie vor rentabel.

Im weltweiten Kontext wies China Ende 2016 eine installierte Kapazität von 78,1 GW auf, gefolgt von Japan mit 42,9 GW, das Deutschland mit seinen 41,2 GW auf den dritten Rang verwiesen hat. Auf Platz vier folgen die USA mit 40,3 GW vor Italien mit 19,3 GW, Großbritannien mit 11,6 GW und Indien mit 9 GW. Indien ist als Newcomer mit hoher Zubaudynamik besonders zu erwähnen. Frankreich (7,1 GW), Australien (5,9 GW) und Spanien (5,5 GW) zählen ebenfalls zu den zehn führenden Ländern bei der installierten Photovoltaikleistung.

Today, average system prices in Germany are between €860/kWp for ground-mounted systems and €1,360/kWp for small rooftop systems. This leads to electricity generation costs of between €5.5 ct/kWh for ground-mounted systems and €12.5 ct/kWh for small rooftop systems. Given ideal geographic location and size, photovoltaic power will become the most cost-effective power generation technology available. In 2017, for example, photovoltaics won a technology-neutral tender in Chile with electricity production costs of €2.71 ct/kWh. This is not an isolated case.

Market development in Germany and worldwide

In Germany, solar energy accounts for about 7% of net electricity generation. This is one of the highest values worldwide. At 1.7 GW in 2017, however, new installed capacity was significantly lower than the 2.5 GW per year expansion path targeted by the Renewable Energy Sources Act. The special calls for tenders currently planned by the German Federal Government in the next two years must therefore be extended in order to achieve the long-term targets for renewable power generation as a whole. In Baden-Württemberg, this will be supported by the federal state's solar offensive planned for 2018 to 2020. In addition to assistance with aspects of planning, this also involves improved information for stakeholders, particularly with regard to the financial returns of photovoltaic systems. In contrast to popular opinion, photovoltaic systems are still profitable.

In a global context, China had an installed capacity of 78.1 GW at the end of 2016, followed by Japan with 42.9 GW and, Germany came third place with 41.2 GW. The USA followed in fourth place with 40.3 GW ahead of Italy with 19.3 GW, Great Britain with 11.6 GW and India with 9 GW. India is particularly noteworthy as a newcomer with high growth dynamics. France (7.1 GW), Australia (5.9 GW) and Spain (5.5 GW) are also among the top 10 countries in terms of installed photovoltaic capacity.

And the market is growing: the added capacity in 2017 should amount to at least 80 GW. This would increase the total installed capacity by 25% to around 390 GW. The share of solar power in the global electricity mix is thus just under 2% and doubles every 4 years at that rate of increase.

Und der Markt wächst: Der Zubau für das Jahr 2017 dürfte sich auf mindestens 80 GW belaufen. Dies wäre eine Steigerung der gesamten installierten Leistung um 25% auf rund 390 GW. Der Solarstromanteil am weltweiten Strommix erreicht damit knapp 2% und verdoppelt sich bei dieser Steigerungsrate alle vier Jahre.

Nicht zuletzt vor dem Hintergrund des Klimaschutzabkommens von Paris und dessen Ziel, die durchschnittliche globale Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen, kommt der Photovoltaik eine zentrale Rolle für die Energieversorgung der Zukunft zu. So geht das 2017 im Rahmen des World Energy Outlook von der Internationalen Energie Agentur (IEA) entwickelte „Sustainable Development Scenario“, das die drei Hauptzielsetzungen „Bekämpfung des Klimawandels unter Einhaltung der Paris-Ziele“, „Zugang zu Energie für jedermann“ und „Verbesserung der Luftqualität“ zum ersten Mal gleichzeitig verfolgt, von einer weltweit erforderlichen installierten Photovoltaikleistung von 3.250 GW im Jahr 2040 aus. Hierzu bedarf es also nahezu einer Verzehnfachung der heute weltweit installierten Leistung.

Um diese Installationszahlen zu möglichst niedrigen Kosten zu erreichen, konzentriert sich die Technologieentwicklung darauf, den Wirkungsgrad von Solarmodulen zu erhöhen und/oder durch veränderte Materialkombinationen deutlich reduzierte Material- und Produktionskosten zu erzielen.

Technologische Entwicklungspotenziale der Photovoltaik

Überblick über die Photovoltaik-Technologien

Für die Photovoltaik geeignete Halbleitermaterialien, die heute industriell eingesetzt werden, sind Silizium, Galliumarsenid und Verbindungshalbleiter aus Cadmiumtellurid (CdTe) oder Verbindungshalbleiter aus Kupfer, Indium, Gallium und Selen (abgekürzt CIGS). Das wichtigste Halbleitermaterial ist Silizium, das 2016 für etwas mehr als 90% aller weltweit hergestellten Zellen eingesetzt wurde. Neben diesen anorganischen Halbleitermaterialien werden auch organische Materialien für den Einsatz in Solarzellen entwickelt.

Die Herstellung von Modulen unterscheidet sich zwischen Silizium und den Dünnschichtmaterialien deutlich. So werden die einzelnen Siliziumzellen nach der Zellfertigung elektrisch miteinander verschaltet und zwischen zwei Glasscheiben bzw. zwischen einer Glasscheibe und einer Rückseitenfolie einlaminiert. Das Solarmodul eignet sich erst durch diesen letzten Schritt für einen stabilen, witterungsgeschützten Betrieb.

Solarmodule aus CdTe oder CIGS werden als Dünnschichtmodule bezeichnet, da die Halbleitermaterialien im Gegensatz zu Silizium (typische Dicke 200 µm) jeweils nur wenige Mikrometer stark sind. In der Dünnschichttechnologie werden nicht wie beim Silizium einzelne Zellen gefertigt und anschließend elektrisch zum Modul verschaltet, sondern die einzelnen Schichten werden bereits

Against the backdrop of the Paris climate agreement and its goal of limiting average global warming to below 2 °C, photovoltaics will play a central role in the energy supply of the future. The Sustainable Development Scenario – developed by the International Energy Agency in 2017 as part of the World Energy Outlook, which for the first time simultaneously pursues the three main objectives of “Addressing climate change”, “Achieving universal energy access” and “Improving air quality” requires a global installed photovoltaic capacity of 3,250 GW in 2040. Achieving this goal requires a nearly tenfold increase in installed global capacity.

In order to realise these installation figures at the lowest possible cost, technological development focusses on increasing the efficiency of solar modules and/or achieving significantly reduced material and production costs through modified material combinations.

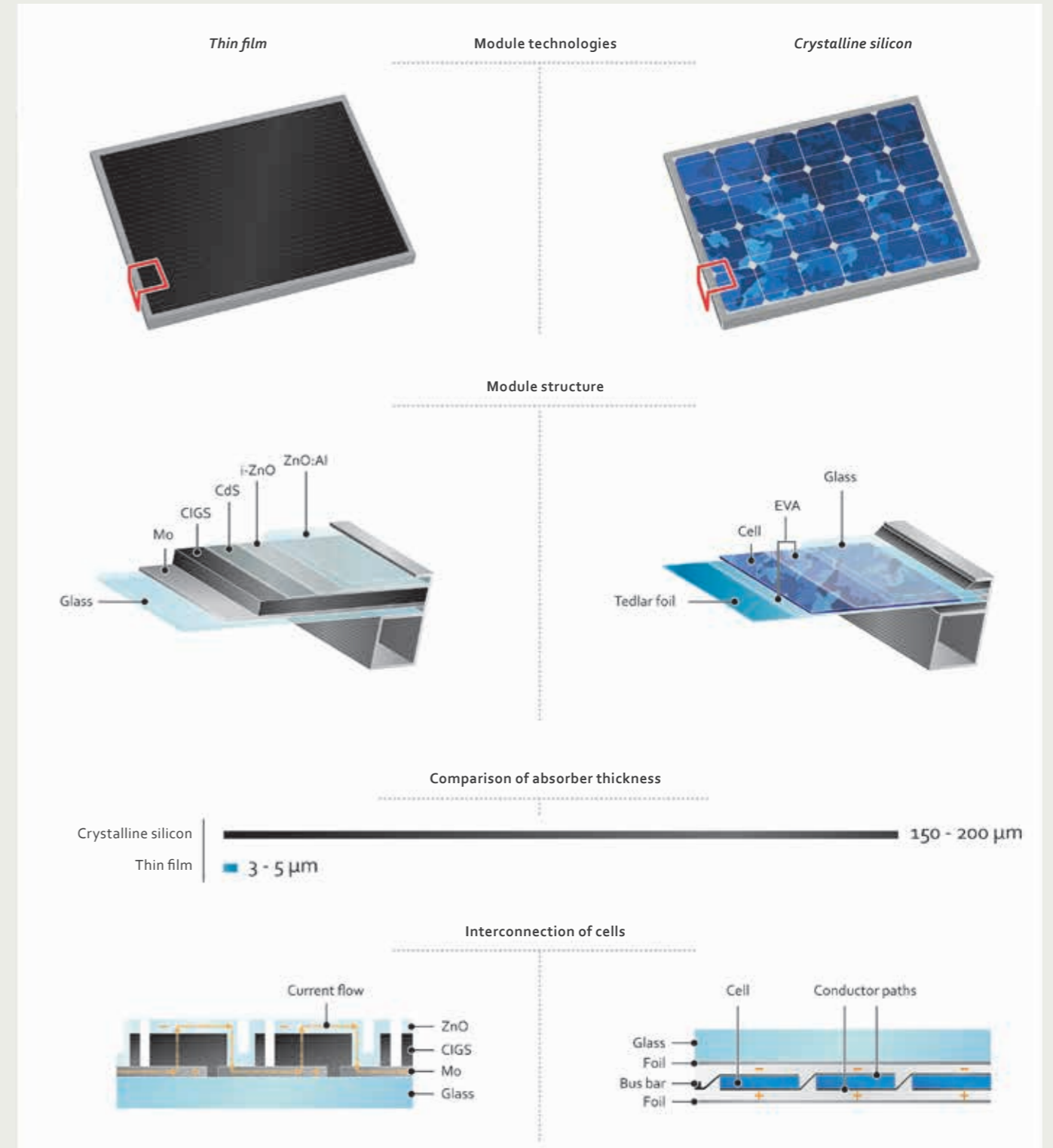
Technological development potential of photovoltaics

Overview of photovoltaic technologies

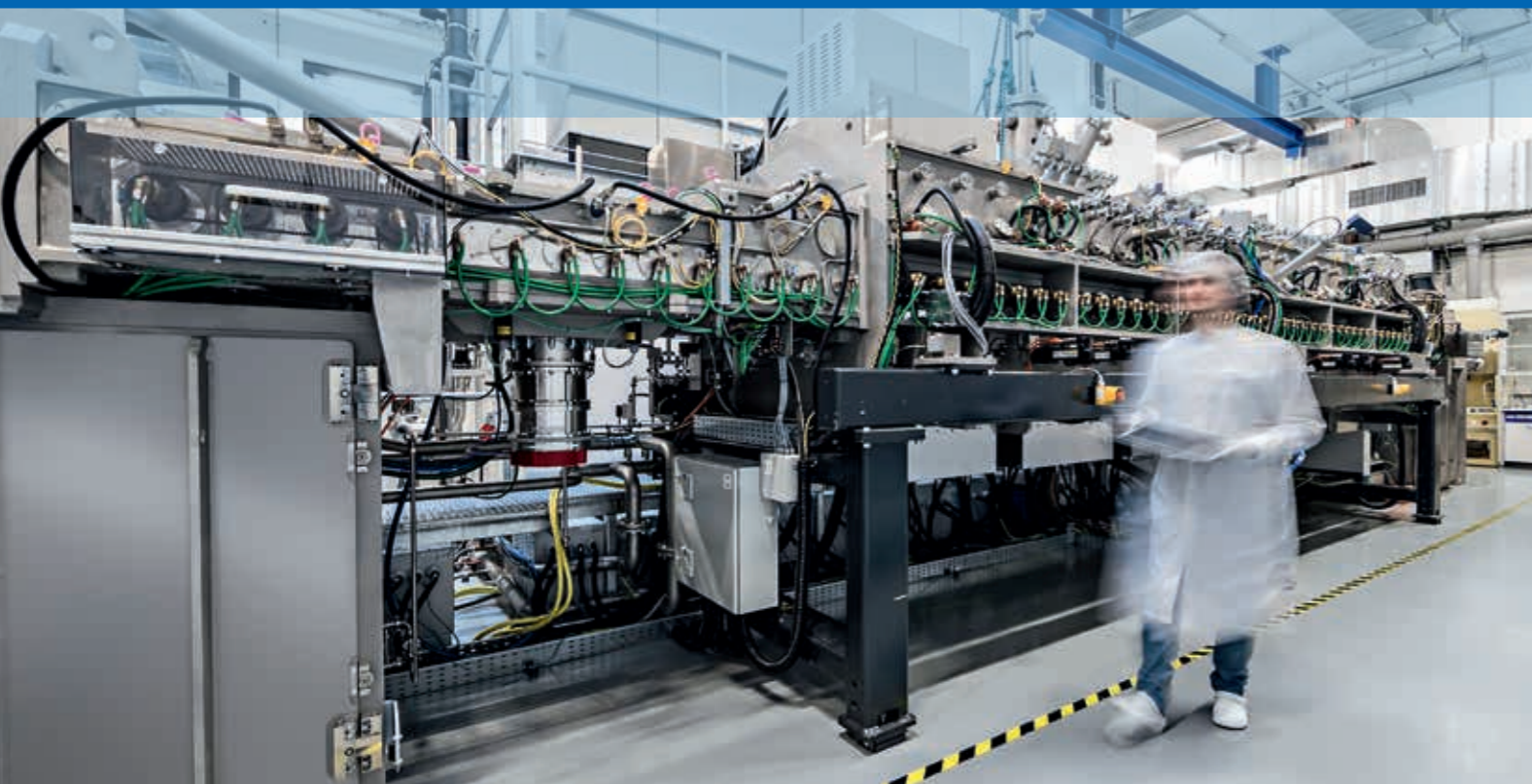
Semiconductor materials suitable for industrial applications today are silicon, gallium arsenide and compound semiconductors made of cadmium telluride (CdTe) or copper, indium, gallium and selenium (abbreviated CIGS). The most important semiconductor material is silicon, which was used for just over 90% of all cells produced worldwide in 2016. In addition to these inorganic semiconductor materials, organic materials are also being developed for use in solar cells.

The production of modules varies significantly based on whether silicon or thin-film materials are used. Following cell production, the individual silicon cells are electrically connected to one another and laminated between two glass panes or between a glass pane and a rear film. This last step renders the solar module suitable for reliable, weatherproof operation.

Solar modules made of CdTe or CIGS are called thin-film modules because the semiconductor materials are only a few micrometres thick, unlike silicon modules (with a typical thickness of 200 µm). For thin-film technology, individual cells are not manufactured like silicon cells and then connected electrically to make the module, but the individual layers are already electrically interconnected using suitable patterning steps during the manufacturing process. The thin layers, which are usually applied over a large area of glass, are then protected by laminating them with a second glass pane in the finished solar module (see fig. right).



//Vergleich des Aufbaus von Solarmodulen in CIGS-Dünnschichttechnologie (links) und aus kristallinem Silizium (rechts). (Grafik: ZSW. Der Schichtaufbau ist nicht maßstabsgetreu.)
 // Comparison of the structure of solar modules using CIGS thin-film technology (left) and crystalline silicon (right). (Graphics by ZSW. The layer structure is not true to scale.)



// Blick ins ZSW-Labor: Neue Inline-Beschichtungsanlage für CIGS-Dünnschichtsolarmodule auf Glas im Format 30 x 30 cm².
// New inline coating plant for CIGS thin-film solar modules in sizes up to 30 x 30 cm².

während des Herstellungsprozesses durch geeignete Strukturen elektrisch verschaltet. Die meist auf einem Glas großflächig aufgetragenen dünnen Schichten werden danach durch Lamination einer zweiten Glasplatte zum fertigen Solarmodul verbunden (s. Abb. auf Seite 23).

Wirkungsgradentwicklung

In den vergangenen Jahren konnte für die genannten Technologien eine weitere deutliche Verbesserung sowohl der Zell- als auch der Moduleffizienzen erzielt werden. So liegen heute die Zellrekordwirkungsgrade für kristallines Silizium über 26 % (mono Si 26,7%, multi Si 22,3%) und bei den Dünnschichttechnologien deutlich über 22 % (CIGS 22,9%, CdTe 22,1%), was sich auch in einer weiteren deutlichen Verbesserung der Wirkungsgrade kommerziell relevanter Modulgrößen auf bis zu 24,5 % widerspiegelt (mono Si 24,5%, multi Si 19,9%, CdTe 18,6%, CIGS 17,5%).

Das ZSW hat im Bereich der industrienahen PV-Materialforschung seinen Schwerpunkt auf der technologischen Weiterentwicklung der CIGS-Technologie. Hier werden aktuell als Forschungsthemen die weitere Verbesserung des Zell- und Modulwirkungsgrades, die Entwicklung alternativer Materialien, z. B. für verbesserte Frontkontaktschichten, und die Entwicklung kostengünstigerer industrieller Herstellverfahren bearbeitet.

Das ZSW steht seit Langem mit an der Spitze der CIGS-Entwicklung und hielt bis Dezember 2017 den Weltrekord für CIGS-Zellen mit einem Wirkungsgrad von 22,6 %. An der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse aus der Zellforschung auf die Modulherstellung wird im ZSW-Technikum für CIGS-Module geforscht. Hier konnte Ende 2017 eine neue Inline-Beschichtungsanlage für Modulformate auf Glas in Größen bis 30 x 30 cm² mit neuesten maschinentechnischen

Development of efficiency

In recent years, a further significant improvement in both cell and module efficiency has been achieved for these technologies. Today, the record efficiencies for crystalline silicon cells are well above 26% (mono Si 26.7%, multi Si 22.3%) and for thin-film technologies well above 22% (CIGS 22.9%, CdTe 22.1%), which is also reflected in a further significant improvement in the efficiency of commercially relevant module sizes up to 24.5% (mono Si 24.5%, multi Si 19.9%, CdTe 18.6%, CIGS 17.5%).

Regarding the area of industry-related PV materials research, ZSW focusses on the technological advancement of CIGS technology. Current research topics are the further improvement of cell and module efficiencies, the development of alternative materials, for example for improved front contact layers, and the development of more cost-effective industrial manufacturing processes.

ZSW has long been at the forefront of CIGS development and held the world record for CIGS cells with an efficiency of 22.6% up to December 2017. In the ZSW technical lab for CIGS modules, research is carried out on transferring the knowledge gained from cell research to module production. At the end of 2017, a new inline coating plant for module formats on glass in sizes of up to 30 x 30 cm² was built with the latest mechanical components (see picture above and report on page 11), which allows the experimental study of current industrial issues, such as higher process speeds, in an industrially relevant laboratory pilot line.

// Focus



// Anlage zur Rolle-zu-Rolle-Beschichtung von flexiblen Substraten am ZSW.
// System for roll-to-roll coating of flexible substrates at ZSW.

nischen Komponenten (s. Bild oben links und Bericht auf S. 11) aufgebaut werden, die die Bearbeitung aktueller Fragestellungen aus der Industrie, wie z. B. höhere Prozessgeschwindigkeiten, in einem industrienahen Prozessmodus erlaubt.

Alternative Substrate für Dünnschichttechnologien

Neben der heute kommerziell dominierenden Glas-Glas-Technologie (Glassubstrat und Glasverkapselung) liegt einer der großen Vorteile der Dünnschichttechnologie darin, dass auch besonders leichte und vor allem flexible Substrate wie Stahl- oder Polymerfolien eingesetzt werden können. Mit flexiblen Modulen lassen sich neue Anwendungsfelder für die Photovoltaik erschließen: gekrümmte Flächen, abrollbare Dachbahnen, ultraleichte Solarmodule für die Raumfahrt, die Integration von Solarzellen in Textilien usw. Zudem besitzt die Abscheidung auf flexiblen Trägern ein großes Kostenreduktionspotenzial durch den geringeren Energieaufwand zum Aufheizen der Folien vor der Beschichtung und durch die Verarbeitung in sogenannten Bandbeschichtungsanlagen, wie sie beispielsweise in der Verpackungs- oder auch in der Druckindustrie zum Einsatz kommen. Solch eine Bandbeschichtungsanlage für eine Beschichtungsbreite bis zu 30 cm ist am ZSW in einem Rolle-zu-Rolle-Technikum verfügbar (s. Abb. oben).

Alternative substrates for thin-film technologies

In addition to today's commercially dominant glass-glass technology (glass substrate and glass encapsulation), one of the major advantages of thin-film technology is that it is also possible to use particularly light and, above all, flexible substrates such as steel or polymer films. Flexible modules open up new fields of application for photovoltaics: curved surfaces, rollable roofing membranes, ultra-light solar modules for space travel, the integration of solar cells in textiles, etc. In addition, deposition on flexible substrates offers a great cost reduction potential due to the lower energy consumption for heating the films prior to coating and through processing in so-called web coating lines, such as those used in the packaging or printing industries. Such a web coating line for a coating width of up to 30 cm is available at ZSW in a roll-to-roll laboratory pilot line (see fig. above).

Technologieentwicklung für die nächste Generation

Die Wirkungsgrade der Einfachzellen, wie sie in den heutigen kommerziell erhältlichen PV-Modulen (Si, CdTe, CIGS) umgesetzt sind, nähern sich dem thermodynamischen und auch technologischen Limit an. Daher werden die nächsten größeren Steigerungen bei den Wirkungsgraden von sogenannten Mehrfachzellen erwartet. Hier versprechen neue Dünnschicht-Materialsysteme wie die sogenannten Perowskite durch kostengünstige Drucktechnologien und die Möglichkeit ihrer Verwendung in Mehrfachzellen weitere Fortschritte.

Bei Mehrfachzellen oder Multispektralzellen wird das Sonnenspektrum optimal ausgenutzt, indem Solarzellen mit unterschiedlich ausgedehnten Absorptionsbereichen direkt in einem Stapel seriell verschaltet werden (s. Abb. unten). Entscheidend ist die optimale Abstimmung der Subzellen-Materialien, damit ein möglichst hoher Photostrom im Gesamtverbund fließt. Dazu muss die obere Zelle (violett) möglichst viel Sonnenlicht zur unteren Zelle gelangen lassen („semitransparent“), gleichzeitig selbst aber sehr effizient sein. Dieses Konzept wird in Höchsteffizienz-Zellen mit über 46% Wirkungsgrad bereits sehr erfolgreich eingesetzt, aufgrund der hohen Herstellungs- und Materialkosten jedoch nur im Bereich der sogenannten Konzentrator-Technik (CPV) oder z. B. im Weltraum.

Ein attraktives, weil kostengünstiges Material als „Tandempartner“ für semitransparente Topzellen ist das Perowskit. Sein Wirkungsgrad konnte von unter 4% im Jahr 2009 auf über 22% im Jahr 2017 gesteigert werden. Dieses Materialsystem ermöglicht es,

Technology development for the next generation

The efficiency of the single cells, as implemented in today's commercially available PV modules (Si, CdTe, CIGS), are approaching thermodynamic and technological limits. Therefore, the next major increases in the efficiency are expected with so-called multi-junction cells. New thin-film material systems such as perovskites promise further progress thanks to low-cost printing technologies and the possibility of application in multi-junction cells.

In the case of multi-junction cells or multi-spectral cells, the solar spectrum is optimally exploited by serially connecting solar cells with different absorption ranges directly in one stack (see fig. below). The optimal tuning of the subcell materials is crucial in order to ensure that the highest possible photocurrent flows in the overall composite. The upper cell (violet) must let as much sunlight as possible reach the lower cell ("semi-transparent"), but at the same time be very efficient. This concept is already used very successfully in highly efficient cells with an efficiency of more than 46%, but due to the high production and material costs it is only used in the area of so-called concentrator technology (CPV) and in space, for example.

Perovskite is a cost-effective material and therefore attractive as a "tandem partner" for semi-transparent top cells. Its efficiency was increased from less than 4% in 2009 to over 22% in 2017.

die etablierten Technologien Silizium und CIGS mithilfe des Konzepts der Mehrfach-Solarzellen auf Wirkungsgrade zwischen 25% und 30% zu heben, d. h. über das theoretische Limit der Einzelzellen hinaus. Allerdings sind noch drei wesentliche Herausforderungen zu bewältigen: a) die Giftigkeit der verwendeten löslichen Bleiverbindungen, b) die bislang begrenzte Langzeitstabilität und c) die Demonstration der technologischen Hochskalierung der Prozesse.

Der aktuelle Wirkungsgrad für eine als Topzelle geeignete semi-transparente Perowskitzelle liegt bei über 18%. Beim Aufbau von Mehrfachzellen mit Silizium als Bottomzelle konnten bereits Effizienzen bis 26,4% und für CIGS als Basiszelle bis 23,9% erzielt werden. Ein wichtiger Schritt hin zur Anwendung ist die Verschaltung dieser einzelnen Zellen zu einem Modul. Hier konnte das ZSW in Zusammenarbeit mit dem IMEC in Belgien und dem KIT das erste Perowskit-CIGS-Tandem-Modul mit einem Wirkungsgrad von knapp 18% auf einer Fläche von 4 cm² zeigen.

Weitere Verbesserungen der PV-Technologien insbesondere im Zellaufbau sind in Bearbeitung. Hier sollen neue funktionale Komponenten wie Passivierungsschichten, Punktkontakte oder neue Verschaltungskonzepte die Wirkungsgrade weiter steigern. Insbesondere für den deutschen Anlagenbau, der eine weltweite Spitzenstellung im PV-Bereich einnimmt, ist es wichtig, weitere Entwicklungen hin zu effizienteren und kostengünstigeren industriellen Herstellverfahren voranzutreiben.

Dies tut das ZSW beispielsweise durch seinen Transfer der CIGS-Dünnschichttechnologie zum Maschinenbau. Es hat Teile seiner Technologie an ein baden-württembergisches Maschinenbau-Unternehmen lizenziert, das seit 2017 gemeinsam mit chinesischen Partnern in China investiert. Durch diese Investition werden mit baden-württembergischer Technologie in China mehrere Fabriken für die Produktion von CIGS-Dünnschichtmodulen gebaut. Die Solarmodule aus dieser Produktion werden von einem chinesischen Energiekonzern in eigenen Solaranlagen genutzt (s. auch Bericht in „Erfolge“, S. 11).

This material system makes it possible to use the multi-junctional solar cell concept to raise the efficiency of established technologies of silicon and CIGS to between 25% and 30%, i.e. beyond the theoretical limits of the individual cells. However, there are still three main challenges to overcome: 1. toxicity of the employed soluble lead compounds, 2. limited long-term stability and 3. demonstration of the technological upscaling of the processes.

The current efficiency for a semi-transparent perovskite cell suitable as a top cell is over 18%. Efficiencies of up to 26.4% have already been achieved in the construction of multi-junction cells with silicon as the material for the bottom cell, and up to 23.9% for CIGS as the material for the base cell. An important step towards application is the interconnection of these individual cells to form a module. In cooperation with IMEC in Belgium and KIT, ZSW was able to demonstrate the first perovskite CIGS tandem module with an efficiency of just under 18% on an area of 4 cm².

Further improvements of the PV technologies, especially to the cell structure, are underway. New functional components such as passivation layers, point contacts or new interconnection concepts could further increase efficiency. Especially for the German industrial equipment engineering industry, which holds a leading position worldwide in the PV sector, it is important to press ahead with further developments towards more efficient and cost-effective industrial manufacturing processes.

ZSW does just that, for example, by transferring CIGS thin-film technology to an industrial engineering and production level. It has licensed parts of its technology to a mechanical engineering company in Baden-Württemberg that started investing in China together with Chinese partners in 2017. As a result of this investment, several CIGS thin-film module factories will be built in China using Baden-Württemberg's technology. The solar modules produced there are used by a Chinese energy group in its own solar energy systems (see also the report in "Achievements", p. 11).

Anwendung und Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik

Gebäudeintegrierte Photovoltaik

Neben den beschriebenen technologischen Weiterentwicklungen, die eine Steigerung der Zell- und Modulwirkungsgrade oder die Kostensenkung zum Ziel haben, erfordern neue Anwendungen weitere Anpassungen der Herstellprozesse und des Designs. Beispielsweise kann die PV im Gebäudebereich auch durch die Einbindung in die Gebäudehülle (Fassaden) eine wichtige Rolle spielen („building-integrated photovoltaics“ oder BIPV). Dazu bedarf es neuer Lösungen, die einen sicheren und kostengünstigen Betrieb gewährleisten.

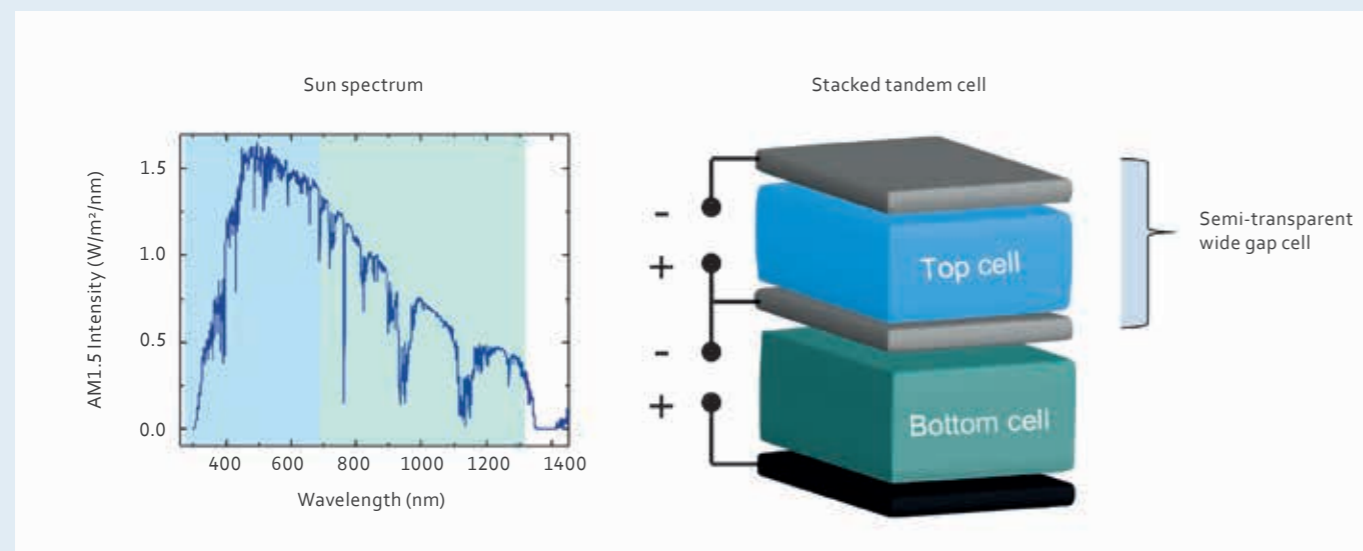
Studien zufolge beträgt in Städten die für die BIPV zusätzlich ökonomisch nutzbare Fassadenfläche im Mittel etwa zehn Prozent der wirtschaftlich nutzbaren Dachfläche in Deutschland. Bei Ge-

The application and economic efficiency of photovoltaics

Building-integrated photovoltaic systems

In addition to the technological developments described above, which are aimed at increasing cell and module efficiency or reducing costs, new applications demand further adaptations of the manufacturing processes and design. For example, PV can also play an important role in the building sector through its integration into the building envelope (façades) ("building-integrated photovoltaics" or BIPV). This requires new solutions that ensure safe and cost-effective operation.

Studies have shown that the additional reasonably useful façade surface area for BIPV in cities is on average about ten percent of the economically usable roof area in Germany.



// Genormtes Sonnenspektrum (AM 1.5) und schematischer Aufbau einer Tandemsolarzelle. Die beiden Subzellen nutzen vor allem die entsprechend farbig markierten Bereiche des Spektrums und können damit einen höheren Gesamtwirkungsgrad erreichen. Als obere Zelle kann eine semitransparente Perowskit-Zelle (blau) ideal mit einer Silizium- oder CIGS-Basiszelle (grün) kombiniert werden.
 // Standardised solar spectrum (AM 1.5) and schematic structure of a tandem solar cell. The two subcells primarily use the correspondingly coloured areas of the spectrum and can thus achieve a higher overall efficiency. For the upper cell, it is ideal to combine a semi-transparent perovskite cell (blue) with a silicon or CIGS base cell (green).

bäuden mit mehr als drei Geschossen ist sogar oft mehr Platz an der Fassade als auf dem Dach. Die Kosten der integrierten Photovoltaik sind zwar höher als die der Aufdachmodule, jedoch relativieren sich die Mehrkosten, wenn die Kosten der alternativ zu erstellenden konventionellen Gebäudehülle gegengerechnet werden. Solarfassaden mit einer Amortisationszeit von zehn Jahren sind so möglich. Angesichts der Klimaziele von Deutschland und Europa auch im Gebäudebereich ist eine verstärkte Nutzung der Energiepotenziale von Fassaden unabdingbar. Daher untersucht das ZSW in einem aktuellen Forschungsprojekt mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft das gesamte System seiner Dünnschicht-photovoltaik-Fassade am Standort Stuttgart (siehe hierzu auch den Bericht auf S. 43).

Wirtschaftlichkeit und Qualitätssicherung von PV-Anlagen

Die Stromgestehungskosten aus PV-Anlagen ergeben sich aus der Summe der Kapitalkosten der Anfangsinvestition und den laufenden Kosten bezogen auf den Energieertrag unter Berücksichtigung der Ertragsverluste aufgrund der Alterung von PV-Modulen.

Modulhersteller garantieren heute standardmäßig 25 Jahre für eine vereinbarte Mindestleistung. Doppelglas-Module werden von den Herstellern bereits mit Garantiezeiträumen von 30 Jahren ausgestattet (wobei die Gebrauchsdauer eines PV-Moduls grundsätzlich nicht auf den Gewährleistungszeitraum des Herstellers beschränkt ist). Die Leistungsgarantie („Limited Peak Power Warranty“) ist dabei eine freiwillige Verpflichtung des Herstellers dem Käufer gegenüber, über den spezifizierten Zeitraum eine bestimmte Leistung des PV-Moduls zu garantieren. Dem Verlauf der Leistung ist in der Regel eine Abnahme im ersten Betriebsjahr von 2 bis 3% unterstellt; ab dem zweiten Jahr wird dann meist eine lineare Abnahme um 0,5 bis 0,7%/Jahr angenommen.

Im Auftrag von Herstellern und Investoren betrachtet das ZSW deshalb im Detail die langfristige Alterung von PV-Modulen. Die Validierung des jährlich gemessenen Energieertrags erfolgt durch Berechnungen aus der Effizienz der Module in Abhängigkeit von der Einstrahlungssituation und Temperatur sowie der Zeitreihe

Buildings with more than three storeys often have more space on their façades than on their roofs. Although the costs of integrated photovoltaics are higher than those of rooftop modules, the additional costs are put into perspective if the costs of the alternative – a conventional building envelope – are taken into account. Solar façades with a payback period of ten years are therefore possible. In view of the climate targets of both Germany and Europe as a whole for buildings, an increased use of the energy potential of façades is essential. In an ongoing research project with partners from science and industry, ZSW is investigating the full system of its thin-film photovoltaic façade at the new building in Stuttgart (see also the report on p. 43).

Efficiency and quality assurance for PV systems

Power generation costs of PV systems are calculated using the sum of the capital costs of the initial investment and the current costs in relation to the energy yield, taking into account the loss of earnings due to ageing PV modules.

Today, module manufacturers guarantee a minimum performance of 25 years as a standard. Manufacturers already provide double-glazed modules with warranty periods of 30 years (whereas the service life of a PV module is not limited to the manufacturer's warranty period). The limited peak power warranty is a voluntary obligation on the part of the manufacturer to the buyer to guarantee a certain performance of the PV module for the specified period of time. As a rule, output is expected to decline by 2% to 3% in the first year of operation; from the second year onwards, a linear decrease of 0.5 to 0.7% per year is generally expected.

ZSW therefore considers the long-term ageing of PV modules in detail on behalf of manufacturers and investors. The validation of the annually measured energy yield is carried out by calculations based on the efficiency of the modules depending on the irradiation situation and the temperature as well as on time series of solar irradiation and other meteorological parameters, taking into account the installation location and module orientation.

der Solareinstrahlung und anderer meteorologischer Kenngrößen unter Berücksichtigung des Installationsorts und der Modulausrichtung. Dabei können Datenblattangaben der Hersteller zur Effizienz genutzt werden, oder die Effizienz und deren Abhängigkeiten für ein vorgegebenes Modul werden individuell im ZSW-eigenen Labor und auf dem ZSW-Solartestfeld vermessen.

Ein wesentliches Ziel ist es, für jeden Fehlermechanismus stark beschleunigte Alterungstests zu entwickeln, mit denen mögliche Schwachstellen, die im Feld oft Jahre bis zum Auftreten benötigen, im Labortest innerhalb von wenigen Tagen oder Wochen zu erkennen sind. Ebenso muss jede neue Technologie möglichst effizient auf ihre Zuverlässigkeit geprüft werden. Dazu sind bei Bedarf Prüfmethoden zu entwickeln, die den speziellen Eigenschaften der Technologie Rechnung tragen.

Der in den letzten Jahren am häufigsten diskutierte Fehlermechanismus ist die potenzialinduzierte Degradation (PID), die erhebliche Leistungsverluste verursachen kann. Die für PID verantwortlichen Leckströme treten insbesondere bei hoher Temperatur, hoher Luftfeuchtigkeit und Nässe auf. Auch eine Erhöhung der Systemspannung auf 1.500 V kann das Risiko für PID erhöhen.

Die meisten Modulhersteller haben in den letzten Jahren die PID-Festigkeit ihrer Module durch verschiedene Maßnahmen signifikant verbessert. Dabei war ein wichtiger Schritt die Entwicklung der technischen Spezifikation IEC TS 62804-1, bei der die Testmethodik spezifiziert, wie Module aus kristallinem Silizium auf PID-Empfindlichkeit getestet werden können. Noch nicht ausreichend geklärt ist die Korrelation zwischen PID-Stressniveau im Labor und der Beanspruchung im Feld, da diese sehr stark von den jeweiligen Umgebungsbedingungen abhängt. Das ZSW forscht an diesem Thema intensiv auf dem Solartestfeld Widderstall und im ZSW-Testlabor für PV-Module Solab (s. Abb. unten).

Efficiency-related data sheet specifications of the manufacturers can be used, or the efficiency and its dependencies for a given module can be individually measured in ZSW's own laboratory and on ZSW's solar testing field.

A key objective is to develop very accelerated ageing tests for each fault mechanism, which will allow potential weak points that often take years to manifest in the field to be detected in laboratory tests within a matter of days or weeks. Similarly, every new technology must be tested for reliability as efficiently as possible. Where required, test methods which take into account the special characteristics of the technology have to be developed.

The most frequently discussed fault mechanism in recent years is potential-induced degradation (PID), which can cause considerable performance losses. The leakage currents responsible for PID occur especially at high temperatures, high humidity and wetness. Increasing the system voltage to 1,500 V can also increase the risk of PID.

In recent years, most module manufacturers have employed various measures to significantly improve the PID resistance of their modules. An important step was developing the technical specification IEC TS 62804-1, in which the test methodology specifies how crystalline silicon modules can be tested for PID sensitivity. The correlation between PID stress level in the laboratory and stress in the field is not yet sufficiently clarified, as it depends very much on the respective environmental conditions. ZSW is researching this topic on the Widderstall outdoor solar testing field and in ZSW's Solab test laboratory for PV modules (see fig. below).



// Blick ins ZSW-Testlabor für PV-Module Solab. Hier: Prüfstand für mechanische Belastungen.
// View of the ZSW photovoltaic test laboratory Solab, here: mechanical load testing facility.

Solarstrom im Energiesystem

Solarstrom im Zusammenspiel mit der Windenergie

Die Rolle des Solarstroms im Energiesystem muss gemeinsam mit der Windenergie betrachtet werden, denn beide bieten für die nationale und internationale Energieversorgung absehbar die größten Potenziale. Sie unterliegen allerdings erheblichen wetterbedingten sowie tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Eine genaue Betrachtung dieser Schwankungen, die sich zum Teil ausgleichen, ist deshalb für die Optimierung des Energiesystems von erheblicher Bedeutung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wärme- und der Kraftstoffsektor ebenfalls unabhängig von fossilen Quellen werden müssen. Mit einer geeigneten Kopplung aller drei Sektoren können die Schwankungen von Sonne und Wind abgefedert werden, indem Überschüsse in der Stromerzeugung für die Produktion regenerativer Kraftstoffe oder günstig speicherbare Wärme genutzt werden.

Konkret ist in der Abb. rechts zunächst gezeigt, wie die Auslegung des „Kraftwerkparcs“ aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen vom angestrebten Anteil an erneuerbaren Energien im Stromsektor abhängt. Schon im Jahr 2030 bei einem Anteil erneuerbarer Energie im Stromsektor von 65% wird die notwendige installierte Kapazität an Windkraftwerken und Photovoltaikanlagen mit rund 100 GW bzw. 90 GW deutlich höher sein als die im Winter auftretenden Strombedarfsspitzen in Deutschland. Diese betragen rund 85 GW – bezeichnet mit „max load“ in der Abbildung. Bei einer 100% erneuerbaren Stromversorgung bis 2050 ist eine installierte Leistung von je 160 GW für Wind und Photovoltaik notwendig. Dadurch kann es zeitweise zu erheblichen Stromüberschüssen kommen.

Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

Die Mehrproduktion von Strom gegenüber dem augenblicklichen Bedarf bei hoher Sonneneinstrahlung oder hohem Windaufkommen kann dann in der Sektorkopplung eingesetzt werden, etwa zur Erzeugung von regenerativem Gas über die Elektrolyse von Wasser mit anschließender Methanisierung des erzeugten Wasserstoffs, wie es am ZSW als „P2G-Verfahren“ entwickelt wurde. Das regenerative Gas kann im Wärme- und Verkehrssektor verwendet werden oder auch zur Rückverstromung in Zeiten von geringem Sonnen- und Windaufkommen. Auch eine direkte Nutzung des Stroms in Wärmepumpen für die Niedertemperaturwärme ist möglich und notwendig, um den Wärmesektor zu dekarbonisieren.

Die kostenoptimalen Ausbaupfade für die installierte Leistung von Photovoltaik- und Windkraftanlagen sind abhängig von der Leistungsfähigkeit des Stromnetzes und dem angestrebten Dezentralisierungsgrad. Durch drei Beispiele wird in der Abb. rechts die Abhängigkeit der Resultate vom Grad des überregionalen Stromaustauschs gezeigt. Für den dezentralen Fall (DEZ) wird Deutschland beispielhaft in zwölf Regionen aufgeteilt mit jeweils 50 TWh Verbrauch. Für diese Regionen wird angenommen, dass sie ihren Strombedarf jeweils autark durch dezentrale Erzeugung decken, d. h. ohne einen Stromaustausch zwischen den Regionen. In den weiteren Beispielen wurde eine ideale Kupferplatte (KUP) angenommen, die einen verlustfreien und uneingeschränkten Stromtransport innerhalb Deutschlands ermöglicht (KUP) bzw. den

Solar power in the energy system

Solar power in combination with wind energy

The role of solar power in the energy system must be considered together with wind energy, because both offer the greatest potential in terms of national and international energy supply. However, they are subject to considerable weather-related as well as daily and seasonal fluctuations. A close examination of these fluctuations, which partly balance each other out, is therefore of considerable importance for optimisation of the energy system. It ought to be borne in mind that the heating and fuel sector must also become independent of fossil fuels. With an appropriate coupling of all three sectors, fluctuations of sun and wind can be cushioned by using surpluses in power generation to produce renewable fuels or cheaply storable heat.

Specifically, the figure on the right shows how the design of the “power plant fleet” consisting of photovoltaic systems and wind turbines depends on the target share of renewable energy sources in the electricity sector. As early as 2030, and with a share of renewable energy in the electricity sector of 65%, the necessary installed capacity of wind turbines and photovoltaic systems of around 100 GW and 90 GW respectively will be significantly higher than the electricity demand peaks occurring in Germany in winter. These peaks amount to around 85 GW – designated “max load” in the figure. For a 100% renewable power supply by 2050, an installed capacity of 160 GW each is required for wind and photovoltaics. This can lead to significant electricity surpluses at times.

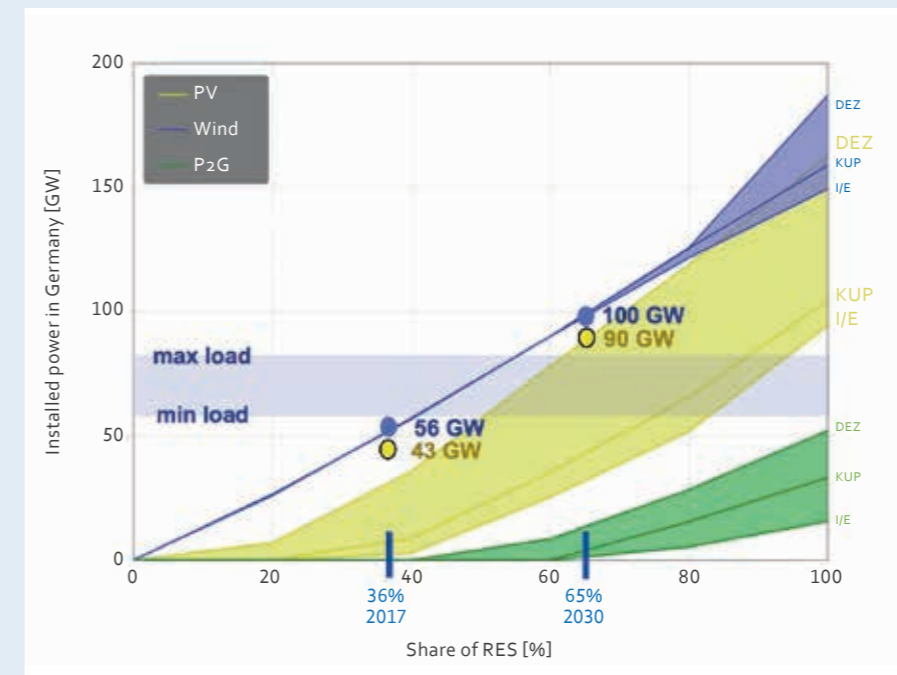
Coupling the power, heat and transport sectors

The excess power produced versus current demand in case of high solar irradiation or a high wind load can then be used in sector coupling. For example, renewable gas can be produced by the electrolysis of water to generate hydrogen and its subsequent methanation, a process developed at ZSW known as “P2G”. The renewable gas can be used in the heating and transport sectors, or for electricity recovery in periods of low solar irradiance and weak wind. Direct use of electricity in heat pumps for low-temperature heat is also possible and necessary to decarbonise the heating sector.

The cost-optimised expansion paths for the installed capacity of photovoltaic systems and wind turbines depend on the efficiency of the power grid and the targeted degree of decentralisation. The figure presents three examples showing how results depend on the degree of supraregional electricity exchange. For the decentralised case (DEZ), Germany is divided into 12 regions, each with 50 TWh consumption. For these regions, it is assumed that they meet their electricity demand independently by way of decentralised generation, i.e. without an exchange of electricity between the regions. In the other examples, an ideal copper plate (KUP) was assumed in order to enable lossless and unrestricted power transmission within Germany (KUP) and an electricity exchange with other countries with an assumed volume of 60 TWh per year (I/E), in order to show the trend of the results.

Stromaustausch mit dem Ausland mit angenommenen 60 TWh pro Jahr (I/E), um die Tendenz der Resultate zu zeigen. Mit dem überregionalen Stromaustausch wird der Ausbaubedarf an Photovoltaik gegenüber dem dezentralen Fall stark reduziert. Jedoch erfordern die zentralen Szenarien einen erheblichen Übertragungsnetzausbau. Angesichts physikalischer Grenzen und höherer Akzeptanz des Photovoltaikausbaus gegenüber dem Netzausbau erscheint daher ein deutlich von der „Kupferplatte“ abweichendes, eher dezentrales Zielszenario aus heutiger Sicht realistischer.

With supraregional electricity exchange, the need for photovoltaic expansion is greatly reduced when compared to the decentralised case. However, the centralised scenarios require considerable expansion of the transmission network. In view of the physical limits and the higher acceptance of photovoltaic expansion compared to grid expansion, a more decentralised target scenario that differs significantly from the “copper plate” seems more realistic from today’s point of view.



// Notwendige Entwicklung der installierten Leistung von Photovoltaik, Windenergie und P2G (Power-to-Gas) bei zunehmender Durchdringung des deutschen Stromsystems mit erneuerbaren Energien. Dabei ist der kostenoptimale Ausbaupfad gezeigt für eine dezentrale Optimierung (DEZ), Deutschland als Kupferplatte (KUP) und für einen internationalen Stromaustausch (I/E) von 60 TWh. Die für die Jahre 2017 und 2030 eingetragenen Werte der installierten Windenergie- (blau) und PV-Leistung (gelb) sind die aktuellen bzw. für das 65%-Ziel angestrebten Werte.

// Required development of the installed capacity of photovoltaics, wind energy and P2G (Power-to-Gas) with increased share of renewable energy sources in the German electricity system. The cost-optimal expansion path is shown for decentralised optimisation (DEZ), Germany as a copper plate (KUP) and for an international electricity exchange (I/E) of 60 TWh. The values entered for the installed wind energy (blue) and PV capacity (yellow) are the current values for 2017 and the values for the 65% target in 2030.

Optimierung der Netzintegration

Durch die Verwendung von lokalen Stromspeichern oder Maßnahmen zur Lastverschiebung lassen sich einerseits die dezentrale Nutzung (und für Gebäude die Selbstnutzung) von Solarstrom erhöhen sowie andererseits unerwünschte Spitzenwerte der Solarstromeinspeisung in das Netz über Mittag an sonnigen Tagen reduzieren. Diese dezentralen Mechanismen reichen jedoch mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien nicht aus, um jederzeit die Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch im Gesamtsystem und die technischen Grenzwerte der Übertragungs- und Verteilnetze einzuhalten.

Deshalb hat das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Schaufenster Intelligente Energien, an dem das ZSW im Projekt C/sells mit den Themen „Hochrechnung, Prognose und Bilanzierung“ beteiligt ist, unter anderem zum Ziel, zukünftige Netzstände genauer vorherzusagen. Ferner sollen Mechanismen zur Abstimmung zwischen Übertragungs- und Verteilnetzen entwickelt und Märkte entworfen werden, in denen die Flexibilität von Verbrauchern belohnt wird. Dies würde die Abstimmung zwischen Erzeugung und Verbrauch marktgetrieben verbessern, die Leistung von Speichern würde bezahlt und Netze könnten effizienter genutzt werden.

Optimisation of grid integration

The utilisation of local power storage systems or load shifting measures can increase decentralised use (and for buildings, own use) of solar power as well as reduce undesired peak values of midday solar power feed into the grid on sunny days. However, as the share of renewable energy use increases, these decentralised mechanisms are not enough to maintain the balance between generation and consumption in the overall system and the technical limit values of the transmission and distribution networks at all times.

For this reason, the “Schaufenster Intelligente Energien” (Smart Energy Showcase) sponsored by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, in which ZSW is involved in the C/sells project with the topics of “Extrapolation, forecasting and balancing” aims at more accurately predicting future grid conditions, amongst other goals. Furthermore, mechanisms to coordinate transmission and distribution networks will be developed, and markets that reward consumer flexibility will be designed. This should improve the balance between generation and consumption on a market-driven basis, pay for the operation of storage facilities and allow networks to be used more efficiently.

// Fachgebiete und
Projekte

// Departments and
Research Projects

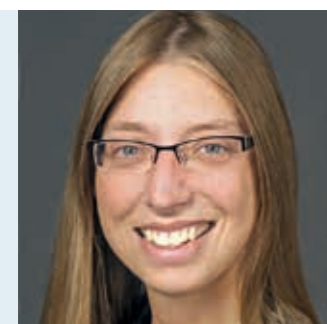
// Systemanalyse (SYS) Systems Analysis (SYS)

// Unsere Kernkompetenzen

Bei der UN-Klimakonferenz in Paris hat sich die Staatengemeinschaft zu einer Begrenzung der Erderwärmung auf unter 2 °C verpflichtet, was weltweit einen vollständigen Verzicht auf den Einsatz fossiler Energieträger bis 2050 bedeutet. Um dies zu erreichen, müssen auf allen politischen Ebenen und in allen Sektoren des Energiesystems Entwicklungen angestoßen, gelenkt oder beschleunigt werden. Das interdisziplinär besetzte Fachgebiet Systemanalyse steht der Politik dabei als kompetenter Berater zur Seite.

Aktivitäten im Bereich des Monitorings, d. h. das Aufzeigen von Fortschritten, aber auch von Hemmnissen und unerwarteten Entwicklungen für die Energiewende gehören ebenso dazu wie die Evaluation, Entwicklung und Implementierung von Instrumenten, um den Transformationsprozess hin zu einem treibhausgasneutralen Energiesystem zu unterstützen. Ergänzt wird dies durch Wirkungsanalysen auf Instrumentenebene, um Fehlentwicklungen punktgenau zu erkennen und Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Des Weiteren werden Potenzial- und Entwicklungsanalysen auf Technologieebene intensiv genutzt, um robuste Zukunftspfade zu identifizieren und der Politik sinnvolle No-regret-Strategien für die kurzfristige Umsetzung vorzuschlagen, die langfristig ausreichende Flexibilität aufweisen, um auf unvorhergesehene Entwicklungen wie etwa durch disruptive Innovationen angemessen reagieren zu können.

Für die Integration erneuerbarer Energien und neuer Technologien in das Energiesystem werden unterschiedliche Modelle und Analyse-Tools eingesetzt. Leistungsfähige Vorhersagesysteme für die Einspeisung von Wind-, Solar- und Wasserkraftstrom vervollständigen das Kompetenzprofil. Darüber hinaus wird das Themenfeld Windenergie sukzessive erweitert, insbesondere durch den Aufbau und den anschließenden Betrieb des weltweit ersten Windforschungstestfelds in bergig-komplexem Gelände zusammen mit dem Forschungscluster WindForS.



„Die Energiewende ist aufgrund ihrer Komplexität auf umfassendes transformatives Wissen angewiesen. Für ihren Erfolg ist die Systemanalyse deshalb von großer Bedeutung, weil sie dies bietet und wichtige Impulse für Entscheidungen in Politik und Wirtschaft geben kann.“

// Dipl.-Wirt.-Ing. Maïke Schmidt, Head of Department
E-mail: maïke.schmidt@zsw-bw.de, phone: +49 711 7870-232

// Our main focus

At the UN Climate Change Conference in Paris, the international community committed itself to limiting global warming to below 2 °C, which means a worldwide total abstinence from the use of fossil fuels by 2050. To achieve this, developments must be initiated, directed or accelerated at all political levels and in all sectors of the energy system. In this context, the interdisciplinary Systems Analysis research department provides expert policy advice.

Monitoring activities, in other words identifying progress as well as obstacles and unexpected developments for the energy transition, are just as important as evaluating, developing and implementing instruments to support the transformation process towards a greenhouse-gas-neutral energy system. These are supplemented by impact analyses at the instrument level in order to precisely detect undesirable developments and to identify countermeasures. In addition, potential and development analyses at the technology level are being intensively used to identify robust future paths and provide policy makers with sensible, no-regret strategies for short-term implementation which will also have sufficient flexibility in the long term to respond to unforeseen developments such as disruptive innovations.

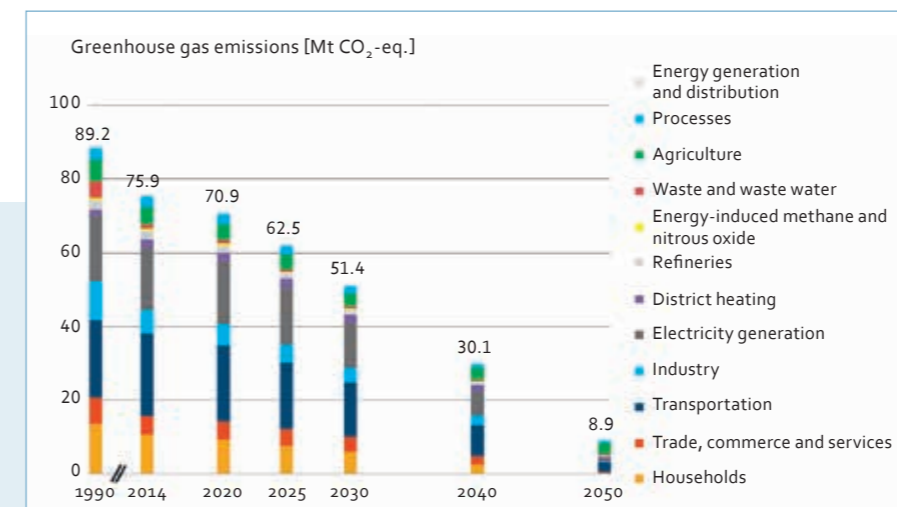
Various models and analytic tools are used to integrate renewable energy and new technologies into the energy system. Sophisticated forecasting systems for the grid injection of wind, solar and hydroelectric power complete the department's range of competencies. In addition, the topic of wind energy is being successively expanded, in particular through the construction and subsequent operation of the world's first wind research test field in mountainous, complex terrain together with the WindForS research cluster.

// Energie- und Klimaschutzziele 2030 in Baden-Württemberg

Zusammen mit verschiedenen Projektpartnern hat das Fachgebiet Systemanalyse in einem Forschungsvorhaben die wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung des Klimaschutzgesetzes Baden-Württemberg und des Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzepts erarbeitet.

Basierend auf der Langfrist-Zielsetzung des Klimaschutzgesetzes, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 90% gegenüber 1990 zu mindern, wurden Entwicklungspfade für die einzelnen Emittentengruppen (Sektoren) ermittelt (s. Abb. unten). Aus dem Zielszenario wurde auch ein Vorschlag für sektorale Treibhausgasminderungsziele für die einzelnen energie- und nicht-energiebedingten Emissionsbereiche Baden-Württembergs für das Jahr 2030 abgeleitet.

Weiterhin wurden Handlungsspielräume des Landes und Schlüsselstrategien identifiziert, mit denen das Land potenziell besonders wirksame Klimaschutzmaßnahmen umsetzen kann. Hierbei sind insbesondere das Landesplanungsrecht, das Beschaffungswesen und das Bauordnungsrecht zu nennen, die in mehreren Sektoren Treibhausgas-Einsparungen induzieren können. Daneben existieren sektorenspezifisch weitere Ansatzpunkte für zusätzliche Anstrengungen des Landes.



// Entwicklung der sektoralen Treibhausgasemissionen im Zielszenario.
// Development of sectoral greenhouse gas emissions in the target scenario.

// Tobias Kelm
E-mail: tobias.kelm@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-250

// Energy and Climate Protection Goals 2030 in Baden-Württemberg

In a research project conducted in conjunction with various project partners, the Systems Analysis research department has developed the scientific basis for further developing the Baden-Württemberg Climate Protection Act and its Integrated Energy and Climate Protection Concept.

Based on the Climate Protection Act's long-term objective to reduce greenhouse gas emissions by 90% by 2050, relative to 1990, development paths were identified for the individual emitter sectors (see fig. below). Proceeding from the target scenario, a proposal for sectoral greenhouse gas reduction targets was derived for the individual energy- and non-energy-related emission areas in Baden-Württemberg for the year 2030.

In addition, key strategies and political options were identified for the federal state which will enable it to implement potentially highly effective climate protection measures. State planning law, procurement and building regulations deserve special attention in this context, since they can induce greenhouse gas savings in several sectors. Besides these, further sector-specific starting points also exist for intensifying the federal state's efforts.



// Errichtung des ersten Windmessmasten auf dem Windtestfeld am Stöttener Berg.
// Installation of the first meteorological mast on the wind test site on Stöttener Berg.

// Kopernikus ENavi – Technologieanalyse und Innovationsforschung

Die Transformation der Energieversorgung umfasst eine Vielzahl miteinander vernetzter und voneinander abhängiger Systeme: das gesamte technologische System, die organisatorischen, politischen und sozialen Strukturen sowie das Verhalten von Unternehmen, Konsumenten und Bürgern. Die Funktionalität des Energiesystems als Ganzes wird nur dann erhalten und weiterentwickelt werden können, wenn die Integration der verschiedenen Bereiche gelingt. Deshalb wird in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekt ENavi mit über 80 Partnerinstitutionen neben disziplinären Fragestellungen ein besonderes Augenmerk auf die Wechselwirkungen, Schnittstellen und das notwendige Zusammenspiel aller Disziplinen gelegt.

Da das Gelingen der Energiewende neben ökonomischen, ökologischen, (ordnungs-)politischen und gesellschaftlichen Aspekten aber gerade auch sehr stark durch geeignete Technologieentwicklungen und Innovationsprozesse beeinflusst wird, engagiert sich das Fachgebiet als Leitung des Themenfelds Technologische Transformation im Kopernikus-Projekt ENavi speziell im Bereich der Technologieanalyse und Innovationsforschung.

Ziel der Arbeiten ist es, die vorhandene Technologiebasis sowie laufende und zu erwartende Technologieentwicklungen strukturiert zu erfassen und zu bewerten. Dabei finden auch die erforderlichen Entwicklungszeitspannen Berücksichtigung. Gleichzeitig wird analysiert, welche Rahmen- und Umfeldbedingungen Innovationen und die Technologieentwicklung und -diffusion befördern oder erschweren. Hieraus werden Instrumente für eine zielgerichtete Ausgestaltung eines positiven Innovationsumfelds als wichtiger Erfolgsfaktor für die Gestaltung des Transformationsprozesses entwickelt. Im Ergebnis soll eine sogenannte Toolbox aus geeigneten Interventionen stehen, die der Politik die notwendigen Elemente und Kombinationen für die Gestaltung von erfolgreichen Innovationsprozessen für die Energiewende zur Verfügung stellt.

// Kopernikus ENavi – technology analysis and innovation research

Transformation of the energy supply involves a multitude of interconnected and interdependent systems: the whole technological system, the organisational, political and social structures as well as the behaviour of companies, consumers and citizens. The functionality of the energy system as a whole can only be maintained and further developed if the integration of the various areas succeeds. For this reason, the ENavi Kopernikus project, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research and includes more than 80 partner institutions, is focussing not just on discipline-specific aspects but also on the interactions, interfaces and necessary interplay between all the disciplines.

The energy transition's success is influenced not only by economic, ecological, (regulatory) policy and social aspects but also – to a very large extent – by suitable technological developments and innovation processes. As the lead body for the "Technological Transformation" topic area in the ENavi Kopernikus project, the research department is therefore particularly focussing on technology analysis and innovation research.

The aim of the work is to collect, structure, and evaluate information on the existing technology base as well as current and expected technological developments, while also taking into consideration the necessary time periods for development. At the same time, the department is also analysing which boundary and environmental conditions will promote or hinder innovation and technology development and diffusion. Based on these results, instruments for specifically designing a positive innovation environment will be developed as an important success factor for shaping the transformation process. This "toolbox" of suitable interventions provides policymakers with the necessary elements and combinations for designing successful innovation processes for the energy transition.

// Einstieg in die Windenergie-Forschung in bergig-komplexem Gelände

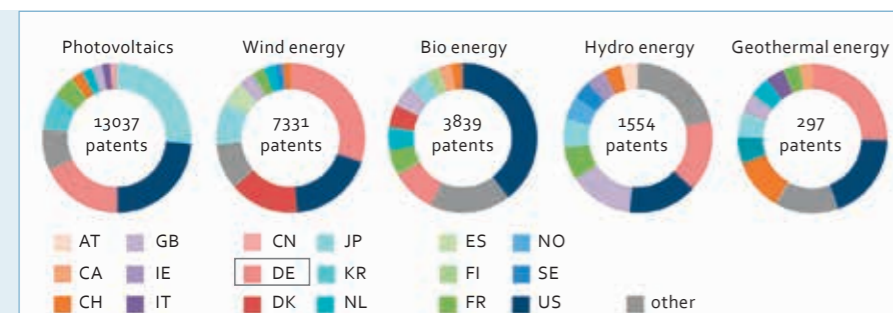
In dem von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Projekt „Wind Science and Engineering in Complex Terrain“ (WINSSENT) wird in Zusammenarbeit mit dem Forschungscluster WindForS das weltweit erste Testfeld für Windenergie in bergig-komplexem Gelände entstehen. Zwei Windenergieanlagen mit einer Nennleistung von je 750 kW, einer Nabenhöhe von 72 m und einem Rotordurchmesser von 54 m bilden das Herzstück des Testfeldes. Für die Wissenschaftler besteht freier Zugriff auf die Regelungstechnik und die Konstruktionsdaten der Anlagen, sodass deren dynamisches Verhalten im Detail analysiert und optimiert werden kann. Die Anlagen werden vom Fundament bis zu den Rotorblättern mit Mess-Sensoren ausgestattet, um eine Vielzahl weiterer für die Anlagenoptimierung relevanter Daten zu erfassen. Vor und hinter jeder Anlage wird jeweils ein 100 m hoher Windmessmast errichtet, der die unterschiedlichsten meteorologischen Parameter erfasst. Die Auswertung dieser Daten verspricht eine Vielzahl neuer Erkenntnisse zum komplexen Zusammenspiel des meteorologischen Umfelds der Anlagen und ihrer Performance.

Parallel zur Vorbereitung der Genehmigung nach dem Bundesimmissionschutzgesetz begann im Juli 2017 das Projekt NatFor-WINSSENT mit Mitteln des Bundesamts für Naturschutz und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Es dient der Konzipierung einer umfangreichen Vogel- und Fledermausforschung auf dem Testfeld, die auf die Entwicklung und den Test von Kollisionsvermeidungssystemen und -maßnahmen abzielt und langfristig zur Auflösung des Konflikts zwischen Windenergienutzung und Natur- und Artenschutz dienen soll. Die Umsetzungsphase soll 2018 beginnen. Das Fachgebiet wird hier seine Kompetenzen im Bereich der maschinellen Lernverfahren mit dem Ziel einsetzen, einen „Birdrecorder“ zur optischen Erkennung von Vögeln zu entwickeln, der als Hauptelement zur Kollisionsvermeidung eingesetzt werden kann.

// Entry into wind energy research in mountainous, complex terrain

In the "Wind Science and Engineering in Complex Terrain" (WINSSENT) project, which is funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and the Baden-Württemberg Ministry of the Environment, Climate and Energy Industry, the world's first test field for wind energy in mountainous conditions is being developed in cooperation with the WindForS research cluster. Two wind turbines which each have a nominal output of 750 kW, a hub height of 72 metres and a rotor diameter of 54 metres form the heart of the test field. The scientists have free access to the control technology and construction data for the wind turbines so that their dynamic behaviour can be analysed and optimised in detail. The wind turbines are equipped with measuring sensors from their foundations to the rotor blades so that a diverse range of additional data that is relevant for the turbine optimisation can be captured. 100-metre-high wind measuring towers, which record diverse meteorological parameters, have been erected in front of and behind each wind turbine. The evaluation of this data promises a multitude of new insights into the complex interaction between the wind turbines' meteorological environment and their performance.

Parallel to the preparation of the test field permit in accordance with the German Federal Immission Control Act, the NatFor-WINSSENT project began in July 2017 with funding from the German Federal Agency for Nature Conservation and the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety. Its purpose is to develop a comprehensive bird and bat research system on the test field with the goal to develop and test collision avoidance systems and measures and, in the long term, resolve potential conflicts between wind energy use and nature and species protection. The implementation phase is scheduled to begin in 2018. The research department will utilise its expertise in machine learning with the aim of developing a "bird recorder" for the visual detection of birds, which can be used as a main element for avoiding collisions.



// Internationale Patentanalyse zur Erfassung des Innovationsumfelds im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugung.
// International patent analysis for surveying the innovation environment in the field of renewable power generation.

// **Maike Schmidt**
E-mail: maike.schmidt@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-232

// **Andreas Rettenmeier**
E-mail: andreas.retttenmeier@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-229

// Photovoltaik: Materialforschung (MAT)

Photovoltaics: Materials Research (MAT)

// Unsere Kernkompetenzen

Der Einsatz von Dünnschicht-Technologien bietet für Photovoltaikmodule ein hohes Potenzial zur Kostensenkung. Insbesondere die auf Kupfer, Indium, Gallium und Selen basierende CIGS-Technologie hat sich bereits in der industriellen Produktion bewährt. Im Fachgebiet MAT werden im Technikum CIGS-Module auf Glas mit einer Größe bis 30 x 30 cm² bzw. auf flexiblen Substraten mit einer Breite bis max. 30 cm auf beliebiger Länge im Rolle-zu-Rolle-Verfahren hergestellt und in ihrer Funktionalität weiterentwickelt.

Die Anlagen zur Herstellung der CIGS-Module sind anders als in einem typischen Laborbetrieb weitgehend für Durchlaufprozesse und damit sehr nah an industriellen Verfahren ausgelegt. Aktuell werden auf Glassubstrat insbesondere im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Vorhabens CISHiTec sowohl verbesserte als auch neue Prozesse für den Transfer in die Industrie erarbeitet. In einem zweiten Technikum wird der Einsatz von flexiblen Substratmaterialien wie Polymer- oder Metallfolien für die Rolle-zu-Rolle-Beschichtung erarbeitet. Neue Dünnschicht-Materialsysteme wie Kesterite und Perowskite bieten das Potenzial, kostengünstige Drucktechnologien einzusetzen, und werden in einem eigenen Labor weiterentwickelt. Auch das für zukünftige weitere Verbesserungen durch den Aufbau von Mehrfachzellen wird, etwa in der Kombination Perowskit und CIGS, am ZSW erforscht.

Die langjährigen Erfahrungen des MAT-Teams in der Entwicklung und Charakterisierung von CIGS-Solarmodulen fließen auch in Dienstleistungen für die Industrie ein: Im Kundenauftrag bearbeiten wir vielfältige materialanalytische Aufgabenstellungen (z. B. hochauflösende Rasterelektronenmikroskopie und Röntgenfluoreszenzanalyse) oder die optische und elektrische Charakterisierung von Zellen und Modulen.

// Our main focus

Thin-film technologies show considerable potential for reducing the costs of photovoltaic modules. The CIGS technology based on copper, indium, gallium and selenium has proved to be particularly suitable for industrial production. At the ZSW technical lab, the MAT research department produces CIGS modules on glass in sizes of up to 30 x 30 cm² and applies the roll-to-roll method on flexible substrates in widths of up to 30 cm combined with any length, working to advance their functionalities.

In contrast to typical laboratory operations, the CIGS module production systems are largely engineered for in-line processes and hence closely mirror industrial processes. In terms of glass substrates, both new and improved processes are currently being developed for transfer to the industrial sector in the context of the CISHiTec project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. In a second technical lab, roll-to-roll coating processes are being developed for flexible substrate materials, such as polymers or metal films. New thin-film material systems, such as kesterites and especially perovskites, which facilitate the use of cost-effective print technologies are under development in a separate lab. ZSW is also researching the potential of further advancements based on multi-junction cell structures combining, for instance, perovskite and CIGS cells.

The MAT team's long-standing experience in developing and characterising CIGS solar modules is also being leveraged for industrial services: for our customers, we provide various material analysis services (for example high-resolution scanning electron microscopy and x-ray fluorescence analysis) or optical and electrical characterisation of cells and modules.

// Analysekammer und Transferarm des ToF-SIMS-Geräts.
// Analysis chamber and transfer arm of the ToF.SIMS device.



// Neue Analytik zum besseren Verständnis von Solarzellen

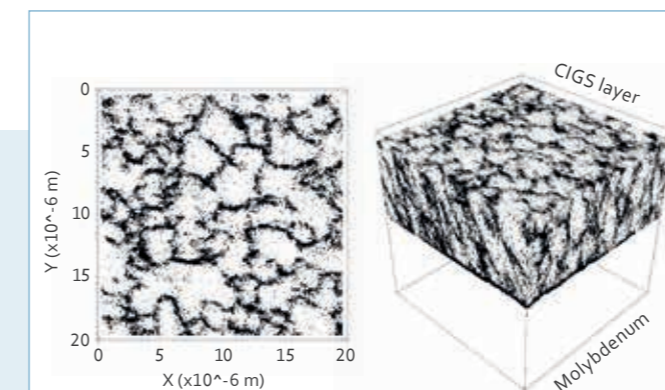
Mit dem Umzug ins neue Gebäude sind auch neue, leistungsfähige Geräte ins Analytiklabor der Photovoltaik-Forscher eingezogen. Sie dienen der gezielten Begleitung der Prozessentwicklung von Dünnschicht-Solarzellen. Dies gilt besonders für die neuen Themen wie Kesterit- und Perowskit-Solarzellen, kadmiumfreie Pufferschichten und die räumliche Verteilung von Alkali-Elementen z. B. nach PDT (post-deposition treatment = Behandlung nach der Abscheidung).

Ein Highlight ist das neue System ToF.SIMS₅ (ToF = Time of Flight = Flugzeit; SIMS = Sekundärionen-Massenspektrometrie) von IONTOF. Im Vergleich zum Standard-SIMS erhält das ToF-SIMS eine räumliche Komponente, indem der Ionenstrahl die Probe abtastet (laterale Auflösung bis 100 nm) und über Messpulse ein Massenspektrum pro Pixel aufnimmt. Mit verschiedenen Ionenquellen kann die Probe so vermessen werden, dass je nach Fragestellung ein optimales Ergebnis erzielt werden kann. So ist zum Beispiel die Lokalisierung und Quantifizierung von Alkali-Elementen wie Natrium, Kalium, Rubidium und Cäsium in der CIGS-Schicht schon lange ein Forschungsthema, da diese Elemente trotz der geringen Mengen die Solarzellenfunktion wesentlich beeinflussen. Mit dem ToF-SIMS ist erstmalig am ZSW eine Methode vorhanden, mit der die räumliche Verteilung dieser Elemente in der CIGS-Schicht aufgelöst werden kann. Somit wird es möglich, die Menge von Alkali-Elementen im Korn, an der Korngrenze und an den Grenzflächen zwischen den Schichten zu messen und zu quantifizieren. Diese Information liefert einen wichtigen Beitrag zur Prozessdefinition, vor allem bezüglich der Übertragung von Prozessen von einem System zu einem anderen. Die neue Methode liefert also wichtige Kenndaten, um Hocheffizienzprozesse, die auf Zellebene entwickelt wurden, auf Modulebene zu verwirklichen.

// New analytics for a better understanding of solar cells

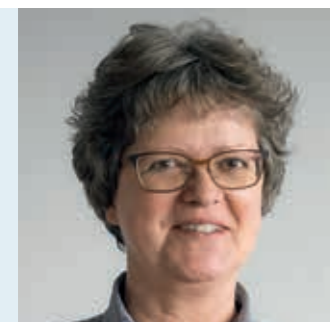
With the relocation into the new building, new high-performance equipment was also installed at the analytical laboratory of the photovoltaic researchers. The equipment provides targeted support for the process development of thin-film solar cells. This applies in particular to new topics such as kesterite and perovskite solar cells, cadmium-free buffer layers and the spatial distribution of alkali elements, for example following PDT (post-deposition treatment).

One highlight is the new ToF.SIMS₅ (ToF = time of flight; SIMS = secondary ion mass spectrometry) system from IONTOF. Compared to the standard SIMS, ToF.SIMS gains a spatial component by scanning the sample (lateral resolution up to 100 nm) and recording one mass spectrum per pixel via measuring pulses. The sample can be measured with different ion sources in such a way that an optimal result can be achieved depending on the respective scientific question. For example, localising and quantifying alkali elements such as sodium, potassium, rubidium and caesium in the CIGS layer has been a topic of research for a long time, as these elements have a significant impact on the solar cell performance despite their small quantities. With ToF.SIMS, a method is finally available at ZSW with which the spatial distribution of these elements in the CIGS layer can be resolved. This means that it is possible to measure and quantify the concentration of alkali elements in the grain, at the grain boundary and at the interfaces between the layers. This information makes an important contribution to process definition, especially with regard to the transfer of processes from one system to another. The new method provides important key data for high-efficiency processes developed at the cell level to be realised at the module level.



// Durch das neue ToF-SIMS gemessene räumliche Verteilung von Rubidium (Rb) in der CIGS-Schicht einer Solarzelle. Dunkle Partien verdeutlichen eine hohe Konzentration des Elements. Das Rb ist verstärkt an den Korngrenzen und an der Grenzfläche zum Molybdän (in der 3-D-Ansicht rechts: unten) vorhanden.

// Spatial distribution of rubidium (Rb) in the CIGS layer of a solar cell as measured by the new ToF.SIMS. Dark areas indicate a higher concentration of the element. Rubidium is concentrated at the grain boundaries and at the boundary surface to molybdenum (on the 3D-image to the right: below).



„Mit dem Umzug ins neue Institutsgebäude haben wir 2017 unser Labor mit neuen Beschichtungsanlagen und Geräten für die Prozess-Analytik ausgebaut, um Wirkungsgrad- und Kostenziele für die Photovoltaik gemeinsam mit unseren Partnern noch schneller erreichen zu können.“

// Dr. Wiltraud Wischmann, Head of Department
E-mail: wiltraud.wischmann@zsw-bw.de, phone: +49 711 7870-256

“With the relocation to the new institute building in 2017, we expanded our laboratory with new coating systems and process analysis equipment in order to achieve efficiency and cost targets for photovoltaics even earlier with our partners.”

// Dr. Theresa Magorian Friedlmeier
E-mail: theresa.friedlmeier@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-293



// Dünnschichtsolartechnologien der Zukunft: SOLAMO

Im Rahmen des dreijährigen, vom Umweltministerium Baden-Württemberg finanzierten Projekts „SOLAMO“ sollen die beiden auf Cu(In,Ga)Se₂ (Kupfer, Indium, Gallium, Selen, kurz: CIGS) und Perowskiten beruhenden Dünnschichtsolartechnologien parallel zueinander durch innovative Ansätze in der Herstellung weiterentwickelt werden. Ziel ist es dabei, die Voraussetzungen für eine zukünftige Perowskit/Tandemstruktur zu schaffen (siehe auch Demonstrator für CIGS-Perowskit-Tandem-Modul).

Für CIGS-Solarzellen wurde eine neue Vakuum-Laborbeschichtungsanlage beschafft. Im Unterschied zu einer vorhandenen Anlage, mit der am ZSW Höchsteffizienz-Solarzellen entwickelt werden, ist diese darauf ausgelegt, besonders flexibel zu sein: Mit ihr lassen sich sowohl bei relativ niedrigen Temperaturen ≤ 450 °C als auch bei hohen Temperaturen ≥ 650 °C hochwertige Absorber auf einer Fläche bis 10×10 cm² herstellen. Die Forscher können damit gezielt bestimmte industrierelevante Parameter wie Dotierung, Abscheideraten oder Substrattemperatur austesten und vorentwickeln. Ein Beispiel ist die Ermittlung der maximal möglichen CIGS-Abscheiderate, die noch im Koverdampfungsprozess zu erzielen ist, bei dem alle Elemente in einem Schritt gemeinsam auf das Substrat aufgedampft werden. Nach dem Aufbau und der Einrichtung der Anlage konnten 2017 in ersten Versuchen bereits gute Zellen mit einem Wirkungsgrad von 16 % hergestellt werden. Neben der Herstellung von CIGS-Solarzellen auf unterschiedlichsten Substraten wie Plastikfolie, Metallfolie oder Metalloxiden und der Erforschung von höchsten Abscheideraten geht es im „SOLAMO“-Projekt auch um die vakuumfreie Herstellung von Perowskit-Absorbern aus der Lösung. Angestrebt sind stabile, d. h. hysteresefreie Effizienzen größer 14 %. Weiterhin sollen bleifreie Absorber untersucht und am Ende funktionsfähige, monolithisch verschaltete Kleinmodule hergestellt werden.



// Die neue hoch flexible Beschichtungsanlage für Solarzellen (oben) und Detail (links).
// The new highly flexible coating system for solar cells (top) and detail view (left).

// Dr. Friedrich Kessler
E-mail: friedrich.kessler@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-201

// Thin-film solar technologies of the future: SOLAMO

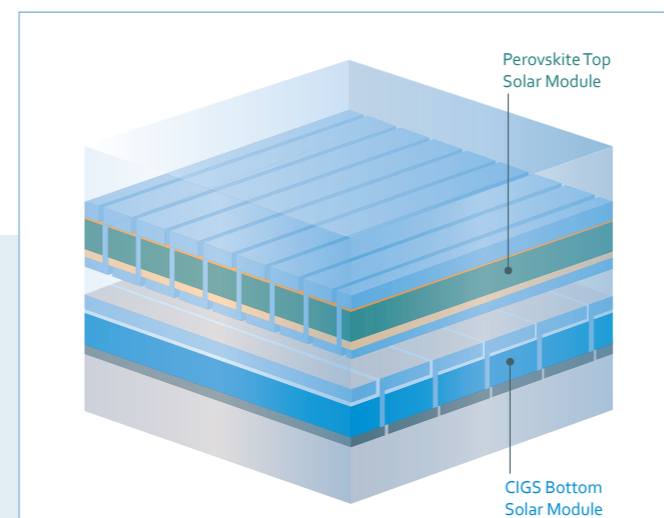
Within the framework of the three-year project "SOLAMO", financed by the Ministry of the Environment of Baden-Württemberg, the two thin-film solar technologies based on Cu(In,Ga)Se₂ (copper, indium, gallium, selenium, in short: CIGS) and perovskites are to be further developed in parallel by using innovative production approaches. The goal is to bring about the prerequisites for a future perovskite/tandem structure (see also demonstrator for CIGS perovskite tandem module).

A new vacuum laboratory coating system was purchased for CIGS solar cells. In contrast to an existing system, which is used at ZSW to develop highly efficient solar cells, this system is designed to be particularly flexible: It can be used to produce high-quality absorbers on a surface area of up to 10×10 cm² at relatively low temperatures of ≤ 450 °C as well as at high temperatures of ≥ 650 °C. The researchers are able to specifically test and pre-develop certain industry-relevant parameters such as doping, deposition rates or substrate temperature. One example would be determining the maximum possible CIGS deposition rate that can still be achieved with the co-evaporation process, in which all elements are deposited onto the substrate in one step. After the construction and installation of the plant, good cells with an efficiency of 16% were already produced in the first experiments of 2017. In addition to the production of CIGS solar cells on various substrates such as plastic film, metal foil or metal oxides and the research of highest deposition rates, the "SOLAMO" project is also dedicated to the vacuum-free production of perovskite absorbers from a solution. The aim is to achieve stable, in other words hysteresis-free, efficiencies of more than 14%. Lead-free absorbers will be examined as well, in order to finally produce functional, monolithically interconnected small modules.

// Demonstrator für CIGS-Perowskit-Tandem-Modul

Mit dem Photovoltaik-Material der Organo-Halogenid-Perowskite lassen sich wegen ihrer hohen optischen Bandlücke von 1,6 eV semitransparente Solarzellen realisieren, bei denen noch möglichst viel Licht im sichtbaren Spektralbereich durch die Zelle hindurchkommt. Damit lassen sich im Dünnschichtverfahren Tandemstapel mit separat abgreifbaren Kontakten („4-Terminal“) aus einer semitransparenten Perowskitzelle und einer darunter montierten CIGS-Solarzelle herstellen. Diese nutzen gemeinsam das Sonnenspektrum besser aus und überwinden so das Effizienzlimit einer Einzelzelle.

In Zusammenarbeit mit dem Interuniversity Microelectronics Center (IMEC) in Belgien und dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) konnte ein skalierbares Dünnschicht-Perowskit/CIGS-Photovoltaik-Modul mit einer Fläche von 3,76 cm² und jeweils sieben bzw. vier monolithisch verschalteten Einzelzellen demonstriert werden. Die Effizienz des einzelnen CIGS-Moduls beträgt dabei zunächst 15,7 % und reduziert sich auf 5,8 %, wenn das semitransparente Perowskit-Modul darüber montiert wird und nun als optischer Filter wirkt. Da das obere Perowskit-Modul aber seine Effizienz von 12,0 % beibehält, ist die rechnerische Gesamteffizienz mit 17,8 % des kombinierten Tandemstapels deutlich höher, als sie jeweils bei den Einzelmodulen sein könnte. Damit ist das prinzipielle Potenzial dieser skalierbaren Dünnschicht-Tandem-Modultechnik klar demonstriert. Mit weiterer Optimierung der Einzelmodule, insbesondere der Effizienz und Transmission der Perowskit-Module, werden in Zukunft noch weit höhere Effizienzsteigerungen möglich sein.



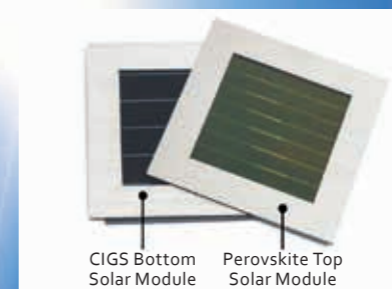
// Demonstrator for the CIGS perovskite tandem module

With the photovoltaic material of organohalide perovskites, semi-transparent solar cells can be realised due to their high optical band gap of 1.6 eV, in which the maximum possible amount of light in the visible spectral range passes through the cell. This allows the production of thin-film tandem stacks with separately accessed contacts ("4-terminal") using a semi-transparent perovskite cell and a CIGS solar cell mounted underneath. Together, they are able to more effectively exploit the solar spectrum and thus overcome the efficiency limit of a single cell.

In cooperation with the Interuniversity Microelectronics Center (IMEC) in Belgium and the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), a scalable thin-film perovskite/CIGS photovoltaic module with an area of 3.76 cm² and seven or four monolithically connected individual cells has been demonstrated. The efficiency of the individual CIGS module is initially 15.7% and is reduced to 5.8% if the semi-transparent perovskite module is mounted above it, now acting as an optical filter. However, since the upper perovskite module retains its efficiency of 12.0%, the overall calculated efficiency of 17.8% of the combined tandem stack is significantly higher than that of the individual modules. This clearly demonstrates the fundamental potential of this scalable thin-film tandem module technology. With further optimisations of the individual modules, in particular the efficiency and transparency of the perovskite modules, even higher efficiency increases will be possible in the future.

// Aufbau des Tandem-Moduls aus Perowskit (oben) und CIGS-Modul (unten).
// Structure of the tandem module consisting of perovskite (top) and the CIGS module (bottom).

// Dr. Erik Ahlswede
E-mail: erik.ahlswede@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-247



// Semitransparentes Perowskit-Modul mit sieben Subzellen über einem CIGS-Modul mit vier Subzellen.
// Semi-transparent perovskite module with seven sub-cells above a CIGS module with four sub-cells.

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



// Unsere Kernkompetenzen

Die Sicherung der Qualität und Stabilität von Solarstrom-Modulen (PV-Modulen) sowie der optimierte Einsatz des Solarstroms im Energiesystem sind die beiden wichtigen Themenfelder des Fachgebiets und seiner Kunden. Auf der Basis von 30 Jahren Test-erfahrung mit PV-Modulen aus kristallinem Silizium (c-Si) und aus Dünnschichtmaterialien werden im Modulstestlabor 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 realen Betriebsbedingungen auf dem Freiland-Testfeld Widderstall des ZSW 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 finanzierender Banken, von Projektierern oder Betreibern.

Photovoltaiksysteme können vor Ort wesentlich zur nachhaltigen Stromversorgung beitragen. Die geeignete Verknüpfung mit elektrischen Speichern, die Kopplung der Sektoren und Lastverschiebung erhöhen die lokale Nutzung von Solarstrom, entlasten die Verteilnetze und tragen dezentral zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch bei. Die Analyse entsprechender Potenziale sowie die Entwicklung von Algorithmen für den optimierten Betrieb von Erzeugern, Speichern und Lasten sind daher weiterführende Themen im Fachgebiet. Das Fachgebiet berät bei der Entwicklung und dem Test entsprechender Algorithmen und Geräte.

// Our main focus

The two main topics of the research department and its clients are to ensure the quality and stability of photovoltaic (PV) modules and an optimised utilisation of solar power in the energy system. Based on 30 years of testing experience with PV modules made of crystalline silicon (c-Si) and thin-film materials, investigations into 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 a detailed determination of degradation effects under real operating conditions on ZSW's Widderstall outdoor test field. Potential-induced degradation (PID) is investigated using accelerated ageing under high voltage and illumination in a climate chamber and on a special outdoor test rig.

Aside from the quality control of PV modules and the impact analysis of interference factors (climate, mechanical loads, soiling and electrical voltage), our consultancy expertise includes due diligence inspections of large-scale PV installations and PV production facilities on behalf of financing banks, project developers and operators.

Photovoltaic systems can make a significant, sustainable contribution to the local power supply. The appropriate combination with electrical storage systems, sector-wise coupling and load shifting all increase the local use of solar power, relieve the distribution networks and contribute to a decentralised balancing of generation and consumption. The analysis of corresponding potentials as well as the development of algorithms for an optimised operation of generators, storage systems and loads are therefore additional topics of the research department. The department advises on the development and testing of corresponding algorithms and devices.

// Fassadenintegrierte Photovoltaik-Systeme in CIGS-Technologie

Das übergeordnete Ziel des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsprojekts „Fassadenintegrierte Photovoltaik-Systeme“ ist die Erschließung der Gebäudefassaden als Markt für die deutsche CIGS-Dünnschichttechnik im Rahmen der für die Energiewende notwendigen Ausschöpfung des gesamten PV-Erzeugungspotenzials in Deutschland. Dabei sollen sowohl fertigungstechnische als auch systemtechnische Fragestellungen gelöst werden. Mit den Industrie- und Forschungspartnern wird das Gesamtsystem durch Variation des Moduldesigns hinsichtlich Energieertrag, Schattentoleranz, Montagefreundlichkeit und Flexibilität der Modulgröße und durch Anpassung an die übrigen Systemkomponenten optimiert. Ergänzend betrachten die Projektbeteiligten das energiewirtschaftliche Potenzial von CIGS-Fassaden hinsichtlich möglicher elektrischer und thermischer Energiedeckungsbeiträge auf Gebäudeebene.

Das ZSW übernimmt Auslegungsrechnungen, Labor- und Felduntersuchungen auf Komponenten- und Systemebene sowie die Erhebung von Betriebsdaten. Die vergleichenden Felduntersuchungen der verschiedenen Systemvarianten hinsichtlich Funktion und Ertrag erfolgen auf dem Testfeld Widderstall. Die Betriebsdaten der CIGS-Testfassade am neuen ZSW-Institutsgebäude in Stuttgart fließen ein in die Simulation des energiewirtschaftlichen Potenzials von CIGS-Fassadensystemen.

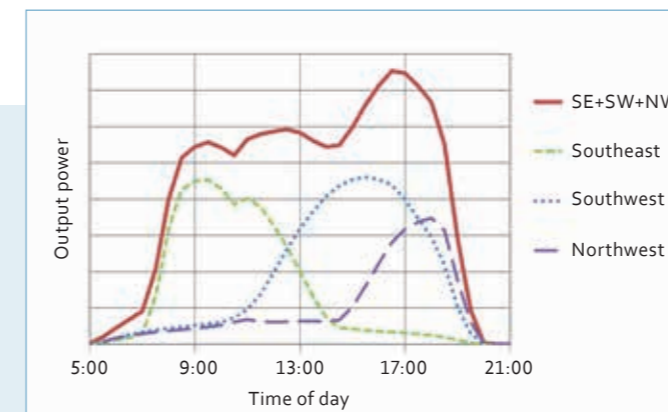
Die Abbildung unten zeigt, dass durch die drei Solarfassaden am ZSW-Gebäude aus der typischen PV-Glockenkurve des Ertrags ein viel gleichmäßigerer Verlauf entsteht, der zum Strombedarf des Instituts passt und durch Vermeidung der Mittagsspitze die Netze entlastet.

// Façade-integrated photovoltaic systems with CIGS technology

The overall objective of the research project “Façade-integrated photovoltaic systems”, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, is to develop building façades as a market for German CIGS thin-film technology as part of the requirement to exploit the entire photovoltaic production potential in Germany for the energy transition. The aim is to solve production and system engineering problems. Together with industrial and research partners, the overall system is being optimised by varying module design with regard to energy yield, shadow tolerance, ease of installation and flexibility of the module size, and by adapting it to the other system components. Complementing this, the project participants are looking at the energy potential of CIGS façades with regard to potential electrical and thermal energy contributions at the building level.

ZSW performs design calculations, laboratory and field investigations at the component and system levels, as well as collecting operating data. The comparative field tests of the different system variants with regard to function and yield are conducted on the Widderstall test field. The operating data of the CIGS test façade on the new ZSW institute building in Stuttgart are used in a simulation of the energy potential of CIGS façade systems.

The illustration below shows that the output power of the three solar façades on the ZSW building produces a much more evenly distributed curve than a typical PV bell curve. The shape matches the electricity requirements of the institute and, by avoiding the midday peak, does not burden the grid.



// Relativer Leistungsverlauf der PV-Fassade auf der SO-, SW- und NW-Seite des ZSW-Gebäudes in Stuttgart sowie die Summenleistung, gemessen im August 2017.
// Time series of PV power of the separate PV façades on the ZSW building in Stuttgart and total power, measured in August 2017.



„Photovoltaik ist die ideale Technologie für einen lokalen und kostengünstigen Beitrag zur Energiewende. Wir kümmern uns um die Stabilität der Module und um deren optimale Einbindung in dezentrale Energiesysteme.“

// Dr.-Ing. Jann Binder, Head of Department
E-mail: jann.binder@zsw-bw.de, phone: +49 711 7870-209

“Photovoltaics is the ideal technology for a local and low-cost contribution to the energy transition. We see to the stability of the modules and their optimal integration into decentralised energy systems.”

// Dieter Geyer
E-mail: dieter.geyer@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-271



// Bestimmung von Degradationsraten bei PV-Modulen und -Generatoren

Ein entscheidender Faktor für die technische Beurteilung und die ökonomische Bewertung von PV-Anlagen und -Kraftwerken ist die verlässliche Ermittlung der Degradationsraten (Leistungsabnahme im Zeitverlauf), welche üblicherweise in der Größenordnung einiger Promille pro Jahr liegen. Wegen der großen Variation der Betriebsbedingungen im realen Freifeldbetrieb müssen für diese Aufgabe ausgefeilte Methoden der Datenauswahl und -analyse entwickelt und verifiziert werden. Am ZSW wurden verschiedene Verfahren untersucht und an langjährigen Datenreihen aus dem Monitoring von PV-Modulen und PV-Generatoren auf dem Testfeld Widderstall validiert. Als aussagekräftig erwiesen sich dabei Methoden, die auf der Regression einer großen Menge zeitlich hoch aufgelöster Einzelmesswerte der Performance Ratio beruhen, welche bei Bestrahlungsstärken nahe dem Referenzwert von 1.000 W/m^2 ermittelt wurden.

Diese Regressionsmethoden können die Degradationsraten von PV-Elementen mit sehr zufriedenstellenden Unsicherheiten ($< 0,05\%$) bestimmen und sind anderen Verfahren, die die Betriebsmessdaten beispielsweise mit Medianbildung über bestimmte Zeitabschnitte aggregieren, statistisch überlegen.

// Determining degradation rates of PV modules and generators

A decisive factor in the technical and economic evaluation of PV systems and power plants is the reliable determination of degradation rates (performance decrease over time), which are usually in the order of a few per mill per year. Due to the considerable variation of outdoor operating conditions, sophisticated methods of data selection and analysis have to be developed and verified for this task. At ZSW, various methods were examined and then validated on the basis of long-term data series gathered by monitoring PV modules and PV generators set up on the Widderstall test field. Methods based on the regression of a large quantity of individual performance ratios taken with a high temporal resolution, which were determined at irradiance levels close to the reference value of $1,000 \text{ W/m}^2$, proved to be meaningful.

These regression methods can determine the degradation rates of PV elements with very satisfactory uncertainties ($< 0.05\%$) and are statistically superior to other methods that aggregate operating measurement data, for example, by calculating the median over certain time periods.

// Smart Europe – gemeinsam intelligente Netze gestalten

Mit den Erkenntnissen aus verschiedenen europäischen Pilotprojekten unterstützt das ZSW Städte und Kommunen bei der Planung und Umsetzung von intelligenten Netzen. Hierbei geht es um die Verknüpfung von Elektrizitäts-, Wärme-, Verkehrs- und Kommunikationsnetzwerken, also die Kopplung der Sektoren und die geeignete Steuerung. Im Projekt „ReFlex“ (Replicability for Flexible Smart Grids), das im Rahmen der europäischen Programminitiative ERA-Net Smart Grids Plus mit Unterstützung des Forschungs- und Innovationsprogramms „Horizon 2020“ der Europäischen Union gefördert wird, sollen ein Replizierbarkeitskonzept und Richtlinien für den Einsatz von technologisch machbaren, marktbasieren und benutzerfreundlichen Lösungen für intelligente Netze mit einem hohen Grad an Flexibilität entwickelt werden. Der Schwerpunkt liegt auf Netzen mit einem erwarteten hohen Anteil erneuerbarer Energie, die vor Ort durch eine Kombination von Maßnahmen in den Bereichen Spannungsregulierung, Nachfragesteuerung und Speicherung effektiv und effizient genutzt werden sollen.

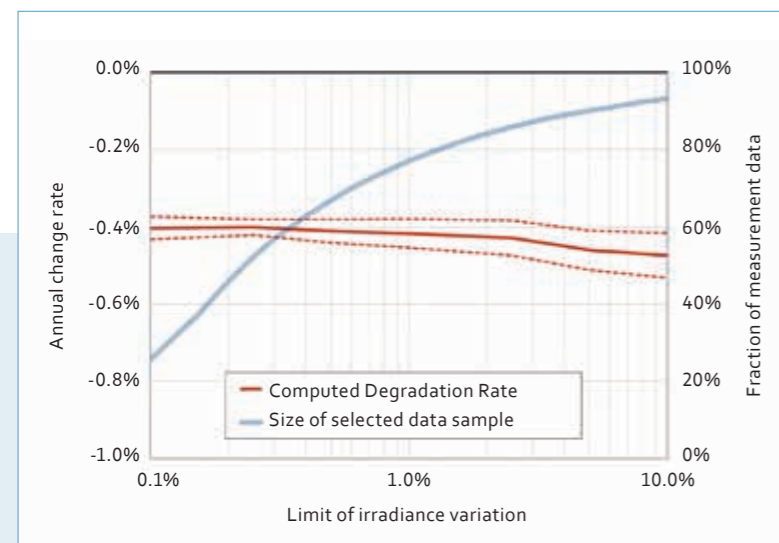
Im Rahmen des „ReFlex“-Projekts werden Smart-Grid-Pilotprojekte analysiert und verglichen. Aus drei großen Demoregionen (Salzburg, Gotland, Hyllie) und fünf kleineren Demoregionen mit weniger als 15.000 Einwohnern (Güssing, Hartberg, Biel-Benken, Rolle und Wüstenrot) in Österreich, der Schweiz, Deutschland und Schweden wird abschließend ein Leitfaden für Städte und Kommunen entwickelt.

// 30 Teilnehmer aus Schweden, der Schweiz, Österreich und Deutschland trafen sich im März 2017 im baden-württembergischen Wüstenrot, einer der kleineren Demoregionen des ReFlex-Projekts, um voneinander zu lernen.
// In March 2017, 30 participants from Sweden, Switzerland, Austria and Germany met at Wüstenrot in Baden-Württemberg, one of the smaller demo regions of the ReFlex project, to learn from each other.

// Smart Europe – designing smart grids together

ZSW supports cities and municipalities in planning and implementing smart grids with the knowledge gained from various European pilot projects. This involves the interconnection of electricity, heat, transport and communication networks, i.e. the interconnection of sectors and their appropriate management. The project “ReFlex” (Replicability for Flexible Smart Grids), which is funded within the framework of the European programme initiative ERA-Net Smart Grids Plus with support from the European Union’s Horizon 2020 research and innovation programme, aims to develop a replicability concept and guidelines for the use of technologically feasible, market-based and user-friendly solutions for smart grids with a high degree of flexibility. The focus is on grids with an expected high share of renewable energy sources, which are to be used effectively, efficiently and locally through a combination of measures in the areas of voltage regulation, demand management and storage.

Smart grid pilot projects are analysed and compared as part of the ReFlex project. Finally, a guideline for cities and municipalities will be developed based on three large demo regions (Salzburg, Gotland and Hyllie) and five smaller demo regions with less than 15,000 inhabitants (Güssing, Hartberg, Biel-Benken, Rolle and Wüstenrot) in Austria, Switzerland, Germany and Sweden.



// Ermittelte jährliche Degradationsrate und ihre Vertrauensbereiche für ein CIGS-PV-Modul bei Einstrahlungen von $1.000 \pm 50 \text{ W/m}^2$ bei verschiedenen Filtern für die Stabilität der Einstrahlung.

// Computed annual degradation rates together with their confidence ranges for a CIGS PV module at irradiances of $1,000 \pm 50 \text{ W/m}^2$ and at various limits of irradiance variations.

// Peter Lechner
E-mail: peter.lechner@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-254



// Im Niedrigenergiehaus unterstützt Photovoltaik die lokale Energiebereitstellung für Strom und Wärme in Wüstenrot.
// In the low-energy houses in the village of Wüstenrot, photovoltaics supports local energy supply for power and heat.

// Simon Hummel
E-mail: simon.hummel@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-330

// Regenerative Energieträger und Verfahren (REG)

Renewable Fuels and Processes (REG)



// Unsere Kernkompetenzen

Leitmotiv des Fachgebiets Regenerative Energieträger und Verfahren ist die Erzeugung regenerativer Brenn- und Kraftstoffe – mit der Kernkompetenz, erneuerbare Energie effizient in leicht transportable, „tankbare“ chemische Energieträger zu überführen und zu speichern.

Im Fachgebiet werden neue Technologien zur Herstellung von Synthesegas, Wasserstoff und Erdgassubstitut (SNG) entwickelt und im technischen Maßstab bis zu mehreren 100 kW erprobt. Neben der Elektrolyse, der Brennstoffreformierung und der Erzeugung strombasierter und biomassebasierter Synthesegase sind die Gasreinigung, die Gaskonditionierung sowie die Kraftstoffsynthese wichtige Aufgabengebiete. Zielsetzung im Themenfeld alkalische Elektrolyse ist insbesondere die Weiterentwicklung des Elektrolyseblocks und die Kostenreduktion der gesamten Wasserstoffherstellungsanlage durch Modularisierung der Systemkomponenten. Zielsetzung bei der Gasprozessertechnik ist die Erzeugung eines brennstoffzellentauglichen Gases, eines Brenngases für die Verstromung bzw. eines konditionierten Synthesegases zur Kraftstoffherzeugung sowie die Gasaufbereitung zur Einspeisung in das Erdgasnetz. Es wurden bereits zwei Power-to-Gas-Anlagen in den Leistungsklassen 25 kW_{el} und 250 kW_{el} am ZSW aufgebaut. An einer Anlage mit 6.000 kW_{el} war das ZSW im Rahmen des Basic Engineerings sowie der Inbetriebnahme beteiligt. An der 6.000-kW_{el}-Anlage nimmt das ZSW weiterhin das Anlagenmonitoring vor. Eine Anlage in der Leistungsklasse von 1.000 kW_{el} wird im Jahr 2018 im Rahmen des vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderten Leuchtturmprojektes „Power-to-Gas Baden-Württemberg“ in Betrieb genommen.

// Our main focus

The core expertise of the Renewable Fuels and Processes department is the production of renewable fuels, including motor fuels. We investigate and test ways to transform renewable energy into easily transportable and storable chemical energy carriers (fuels).

The department develops new technologies for the production of synthesis gas, hydrogen and substitute natural gas (SNG) and tests these on a pilot scale of up to several hundred kilowatts. Alongside electrolysis, fuel reforming and the production of syngas based on both biomass and electricity, our activities also focus on gas purification, conditioning and fuel synthesis. Particular objectives in the field of alkaline electrolysis are to develop electrolysis blocks and reduce the cost for overall hydrogen generation systems by means of modularising system components. Our aims in the area of gas processing technology are to produce a suitable gas for fuel cells, fuel gas for electricity generation, conditioned synthesis gas for fuel production and substitute natural gas to be distributed through the natural gas grid. Two power-to-gas plants have already been built at ZSW in the 25 kW_{el} and 250 kW_{el} power classes. ZSW was also involved in the basic engineering and commissioning of another 6,000 kW_{el} plant. It is continuing to monitor the 6,000 kW_{el} plant on an ongoing basis. A further system in the 1,000 kW_{el} power class will be commissioned in 2018 as part of the “Power-to-Gas Baden-Württemberg” flagship project funded by the Baden-Württemberg Ministry for Economic Affairs.

// CORAL – CO₂-Rohstoff aus Luft: effizientes Verfahren zur CO₂-Bereitstellung

Kohlendioxid (CO₂) ist einerseits ein Klimagas, zugleich kann es aber auch als Ressource dienen – etwa für Kunststoffe oder erneuerbare Kraftstoffe – und damit in Zukunft fossiles Erdgas sowie Erdöl ersetzen. Die Gewinnung von CO₂ aus der Luft leistet in mehrfacher Hinsicht einen Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels: Sie macht es für die chemische Industrie sowie regenerative Mobilität nutzbar und ermöglicht so künftig eine Reduzierung der Emissionen gegenüber der Nutzung fossiler Brennstoffe. Zur Gewinnung des in der Luft enthaltenen CO₂ für nachfolgende Rohstoff-Synthesen gibt es bereits mehrere Technologien. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts CORAL wird zunächst ermittelt, welches Verfahren am besten geeignet ist, um den Energieaufwand für die CO₂-Bereitstellung gering zu halten. Dies kann beispielsweise durch die Nutzung von Abwärme aus anderen Prozessschritten für die CO₂-Desorption realisiert werden.

Im nächsten Schritt soll eine Versuchsanlage gebaut werden, um dieses Verfahren zu testen. Ziel ist die Bereitstellung von synthese-tauglichem CO₂, aus dem chemische Schlüsselverbindungen wie Methanol, Dimethyl-Ether und Propylen perspektivisch über den rein regenerativen Weg aus erneuerbaren Ressourcen hergestellt werden können.

// CORAL – CO₂ raw material from air: an efficient process for providing CO₂

Although carbon dioxide (CO₂) is a greenhouse gas, it can also serve as a resource – for example, for plastics or renewable fuels – and thus replace fossil natural gas and crude oil in the future. The extraction of CO₂ from the air contributes in several ways to combating climate change: it makes it usable for the chemical industry and for renewable mobility, thus making it possible in future to reduce emissions compared with the use of fossil fuels. Several technologies are already available for capturing the CO₂ contained in air for subsequent raw material syntheses. The CORAL project, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research, will initially determine which method is best suited for minimising the energy required for supplying CO₂. This can be achieved, for example, by utilising waste heat arising from other process steps for the CO₂ desorption.

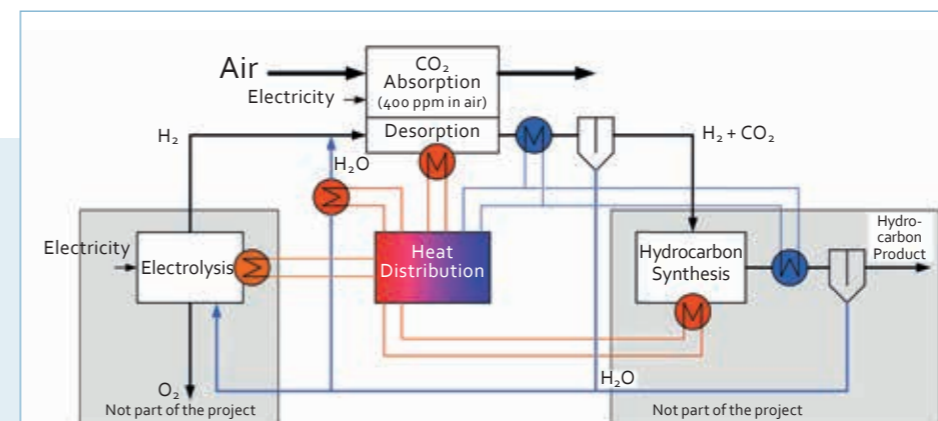
In the next step, the plan is to build a pilot plant to test this process. The aim is to provide CO₂ suitable for synthesis, from which key chemical compounds such as methanol, dimethyl ether and propylene could then be produced by regenerative means using purely renewable resources.



„Ohne regenerative strombasierte Kraftstoffe (eFuels) wird die Energiewende nicht gelingen.“

// Dr. Michael Specht, Head of Department
E-mail: michael.specht@zsw-bw.de, phone: +49 711 7870-218

“The energy transition will not succeed without renewable e-fuels.”



// Abwärmennutzung aus dem Elektrolyse- und Syntheseprozess für die CO₂-Bereitstellung aus Luft.
// Utilisation of waste heat from the electrolysis and synthesis process for supplying CO₂ from the air.

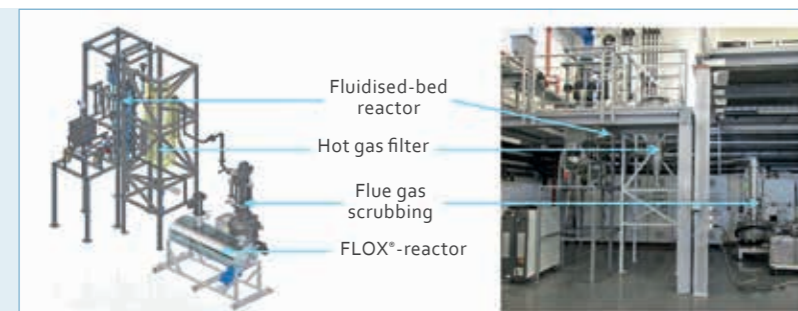
// Dr. Ulrich Zuberbühler
E-mail: ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de
Phone: +49 711 7870-239



// Signifikante P₂X-Wirkungsgradsteigerung durch Kopplung von OxyFuel-Prozess und Hochtemperatur-Elektrolyse

Die Kombination von Hochtemperatur-Elektrolyse und OxyFuel-Verbrennung kann den Wirkungsgrad von Power-to-X-Prozessen drastisch steigern. Den Nachweis dafür will das ZSW im Rahmen der auf zehn Jahre angelegten Förderinitiative „Kopernikus-Projekte für die Energiewende – flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen: Power-to-X“ erbringen. Dabei erfolgt die Gewinnung von Wasserstoff durch eine Hochtemperatur-Elektrolyse mit keramischem Festelektrolyten (HT-SOEL, High Temperature Solid Oxide Electrolysis). Ziel ist ein elektrischer Energiebedarf von $2,5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}_{\text{STP}}^3 \text{ H}_2/\text{CO}$. Dies wird durch Einkopplung von HT-Wärme aus einer sogenannten OxyFuel-Verbrennung in die HT-SOEL erreicht (Verbrennung eines Brennstoffs in O_2 und rezykliertem Rauchgas). Der dafür notwendige Sauerstoff für die Verbrennung wird in der HT-SOEL produziert. In einem weiteren Schritt wird das CO_2 aus dem OxyFuel-Prozess mit dem elektrolytisch erzeugten H_2 in einen kohlenstoffhaltigen Sekundärenergieträger oder Basis-Chemikalien konvertiert.

In der Förderphase I wird die Machbarkeit eines Hauptprozessschrittes untersucht – der OxyFuel-Verbrennung von fester Biomasse. Dazu werden zwei Reaktorkonzepte entwickelt, analysiert und miteinander verglichen: ein Wirbelschichtreaktor (fluidised bed, FB) sowie ein Feststoffbrenner im sogenannten FLOX®-Modus (flammenlose Oxidation). Ziel ist die Erzeugung eines O_2 -armen Rauchgasstroms definierter Temperatur, um zukünftig Hochtemperaturwärme für den endothermen HT-SOEL-Betrieb sowie CO_2 für eine nachgeschaltete Synthese bereitzustellen. Ergänzend wird simulationsgestützt ein geeignetes Verfahrenskonzept für die Kopplung mit einer HT-SOEL identifiziert, das in der folgenden Förderphase realisiert und experimentell untersucht werden soll. Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.



// OxyFuel-Biomasseverbrennung für die Erzeugung von CO_2 , Dampf und Hochtemperaturwärme; Engineering und Aufbau (12/2017).

// OxyFuel test facility for simultaneous generation of CO_2 , steam and high temperature heat: engineered process components and site view (12/2017).

// Dr. Jochen Brellochs

E-mail: jochen.brellochs@zsw-bw.de

Phone: +49 711 7870-211

// Significant P₂X efficiency increase by coupling the OxyFuel process with high-temperature electrolysis

Combining high-temperature electrolysis and OxyFuel combustion can dramatically increase the efficiency of Power-to-X processes. ZSW wants to verify this as part of the 10-year funding initiative entitled "Kopernikus Projects for the Energy Transition – Flexible Use of Renewable Resources: Power-to-X". Here hydrogen will be produced by means of high-temperature electrolysis with a ceramic solid electrolyte (HT-SOEL, High Temperature Solid Oxide Electrolysis). The goal of an electrical energy demand of $2.5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}_{\text{STP}}^3 \text{ H}_2/\text{CO}$ will be achieved by coupling HT heat from so-called OxyFuel combustion (combustion of a fuel in O_2 and recycled flue gas) into the HT-SOEL. The oxygen required for the combustion will be produced in the HT-SOEL. In a further step, the CO_2 from the OxyFuel process will be converted with the electrolytically generated H_2 into a carbon-containing secondary energy source or basic chemicals.

In the initial funding phase, the feasibility of a main process step is being investigated: the OxyFuel combustion of solid biomass. For this purpose, two reactor concepts are being developed, analysed and compared: a fluidised bed reactor (FB) and a solid fuel burner in so-called FLOX® mode (flameless oxidation). The aim is to generate a low- O_2 flue gas stream with a defined temperature in order to provide high-temperature heat for the endothermic HT-SOEL operation and CO_2 for downstream synthesis in the future. In addition, simulations will be used to identify a suitable process concept for coupling with an HT-SOEL, which will be realised and experimentally investigated in the subsequent funding phase. The work is being funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

// Leuchtturmprojekt Power-to-Gas in Baden-Württemberg

Projektziel ist die Weiterentwicklung der Power-to-Hydrogen-Technologie mit dem Fokus auf der Erzeugung von strombasierendem Wasserstoff (sog. eH₂) für den Mobilitätssektor.

Grundlage für die F&E-Aktivitäten ist die Vermessung einer nach dem aktuellen Stand der Technik neu errichteten Power-to-Hydrogen-Anlage in der Leistungsklasse 1 MW_{el} am Wasserkraftwerk Wyhlen am Hochrhein (s. Abb. oben). Die Planungs- und Genehmigungsphase wurde vom Betreiber im Dezember 2017 abgeschlossen und mit dem Bau der Anlage begonnen. Die Inbetriebnahme ist für Oktober 2018 geplant. Der gereinigte und auf 200 bar komprimierte eH₂ wird in Trailer abgefüllt und kann so beispielsweise zu H₂-Tankstellen transportiert werden. Mithilfe eines Monitoring-Systems mit umfangreicher Zusatzmesstechnik bilanziert das ZSW die Gesamtanlage und alle wesentlichen darin verbauten Komponenten und Subsysteme.

In einer an die industrielle Anlage angebotenen F&E-Plattform wird das ZSW eine eigene alkalische Druck-Elektrolyseanlage erproben (s. Abb. unten). Die Anlage ist auf eine Anschlussleistung bis zu 1 MW_{el} ausgelegt und wurde Anfang 2017 CE-zertifiziert. Im Projekt sollen darin effizienz- und kostenoptimierte Elektrolyseblöcke bis zu 300 kW_{el} im industriellen Umfeld getestet werden. Ziele der Begleitforschung sind u. a. die Ausarbeitung einer Technologie-Roadmap sowie die Konzeption von Geschäftsmodellen für die eH₂-Nutzung in der Mobilität. Neben dem ZSW als Koordinator sind drei weitere Forschungsinstitute und sieben assoziierte Industriepartner an dem Projekt beteiligt, das vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg gefördert wird.



// Illustration zum Standort der Power-to-Hydrogen-Anlage am Wasserkraftwerk Wyhlen. Quelle: Energiedienst.
// Illustration showing the site of the power-to-hydrogen facility at the Wyhlen hydropower plant. Source: Energiedienst.

// Power-to-gas flagship project in Baden-Württemberg

The project aims to further develop the power-to-hydrogen technology with the focus on generating electricity-based hydrogen (so-called eH₂) for the mobility sector.

The R&D activities are based on the operational-test measurement of a state-of-the-art power-to-hydrogen plant in power class 1 MW_{el}, which is being constructed at the Wyhlen hydropower plant on the Upper Rhine (see illustration above). The planning and approval phase was completed by the operator in December 2017, and construction of the facility has now begun. The plant is scheduled to be commissioned in October 2018. The eH₂, which will be cleaned and compressed to 200 bar, will be filled in trailers and can therefore be transported, for example, to H₂ gas stations. With the help of a monitoring system with extensive additional measuring technology, ZSW is evaluating the entire system and all the essential components and subsystems installed in it.

In an R&D platform connected to the industrial facility, ZSW will test its own alkaline pressure electrolysis plant (shown below). The system is designed for a connected load of up to 1 MW_{el} and was CE-certified in early 2017. The project will test efficiency- and cost-optimised electrolysis blocks up to 300 kW_{el} in an industrial environment. The goals of the accompanying research include developing a technology roadmap and designing business models for eH₂ use in mobility. In addition to ZSW as the coordinator, three other research institutes and seven associated industrial partners are involved in the project, which is being funded by the Baden-Württemberg Ministry for Economic Affairs, Labour and Housing.

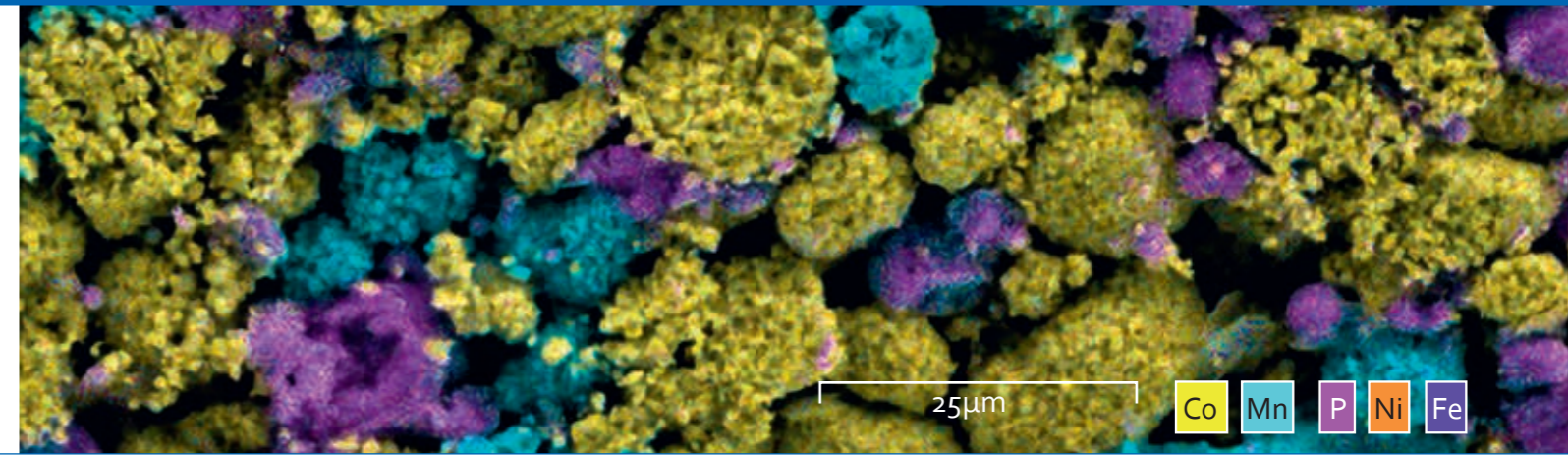
// Alkalische Druck-Elektrolyseanlage des ZSW.
// Alkaline pressure electrolysis system at ZSW.

// Dr. Marc-Simon Löffler

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

Phone: +49 711 7870-233

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



// REM-Aufnahme des Querschnitts einer Blendkathode mit verbesserten Eigenschaften überlappt mit einem EDX-Mapping zur Elementanalyse.
// SEM image showing the cross-section of a blend cathode with improved properties overlapped with an EDX mapping for elemental analysis.

// Unsere Kernkompetenzen

Der traditionelle Schwerpunkt der Arbeiten des Fachgebiets ECM liegt in der Synthese und Charakterisierung von Funktionsmaterialien für Batterien und Superkondensatoren. Kernkompetenz ist die Entwicklung maßgeschneiderter Pulver. 30 Jahre Materialforschung bilden die Basis für das umfangreiche Verständnis der Zusammenhänge von Struktur und Pulvermorphologie bezüglich gewünschter Funktions- und Verarbeitungseigenschaften. Neben neuen Kathodenmaterialien wie Hochvoltspinelle, Lithiumübergangsmetallphosphate und -silikate und Anodenmaterialien (z. B. optimierte Kohlenstoffmodifikationen, Titanate und Legierungsanoden) für Lithium-Ionen-Batterien wird intensiv an neuen Elektrolytsystemen mit speziellen Additiven und an Elektrodenmaterialien für zukünftige Systeme wie Lithium/Schwefel und Lithium/Luft geforscht.

Im Labormaßstab können Prototypen im Format 1865021700 und gestapelte Pouchzellen für Forschungszwecke hergestellt werden. Ziel der Entwicklungen sind angepasste vorindustrielle Fertigungsprozesse für neuartige, leistungsfähigere Komponenten zukünftiger Zellgenerationen. Bisher gefertigte Zellen mit selbst entwickelten Elektroden zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit und Zyklenstabilität. Ein weiterer Fokus liegt auf der Prozessierung von Hochenergieelektroden mit wässrigen Bindersystemen und auf der Entwicklung von Zellen mit Hochvoltspinellen.

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

// Our main focus

The work of the ECM department traditionally focusses on synthesising and characterising functional materials for batteries and supercapacitors with core expertise in the development of custom powders. 30 years of materials research provide the basis for our comprehensive understanding of the interaction 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 as well as anode materials (for example 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.

Prototypes can be researched on laboratory scale with cells in 1865021700 format and stacked pouch cells. The goal is to develop new and high-performing components for future cell generations that can be adapted for industrial production. Cells produced with electrodes developed at ZSW show very high reproducibility and cycling stability. A current focus is the processing of high-energy electrodes with aqueous binder systems and the development of cells consisting of high-voltage spinel cathode materials.

The department is specialised in the area of post-mortem analysis to understand failures in battery components and evaluate new cells. The analytical results are essential for understanding ageing processes and potential safety risks and to optimise cell design.

// Wasserbasiertes Herstellen von kobaltarmen Kathoden

Ein Konsortium aus Industriepartnern und dem ZSW arbeitet innerhalb des Verbundprojekts „Oekobat-2020“ an einer deutlichen Verbesserung der Performance, Kosten und Umweltfreundlichkeit von High-Energy-Lithium-Ionen-Zellen. Das Projekt ist stark auf ein Upscaling zu einer großen und wirtschaftlichen Produktion von Lithium-Ionen-Batterien in Deutschland ausgerichtet. Durch verbesserte Graphite konnten Anoden mit hoher Leistungsdichte in einem wasserbasierten Prozess hergestellt werden. Auf der Kathodenseite wurden jeweils Materialien mit hoher Energiedichte, hoher Strombelastbarkeit und hoher thermischer Sicherheit zu sogenannten Blendelektroden kombiniert. Dazu wurden nickelreiches Lithium-Nickel-Kobaltmanganoxid (NCM) und die kobaltfreien Materialien Lithiummanganspinell (LMO) und Lithiummanganeisenphosphat (LMFP) eingesetzt.

Im Vergleich zu herkömmlichen NCM-Kathoden für Hochenergieanwendungen wurde die Kapazität bei hohen Strömen deutlich erhöht und die thermische Sicherheit zu höheren Temperaturen ausgedehnt. Außerdem wurden der Anteil des toxischen, teuren und je nach Herkunft ethisch bedenklichen Elements Kobalt halbiert und die Rohstoffkosten des Kathodenaktivmaterials um 35% reduziert (s. Abb. unten). Nach fast zwei Jahren Forschungsarbeit steht nun die Herstellung von Demonstratorzellen mit höherer Leistungsdichte, höherer Sicherheit, verbesserter Ökobilanz und geringeren Kosten im PHEV-1-Format bevor. Diese Zellen werden anschließend in gealtertem Zustand in stationären Speichern für ein Recyclingkonzept erprobt.

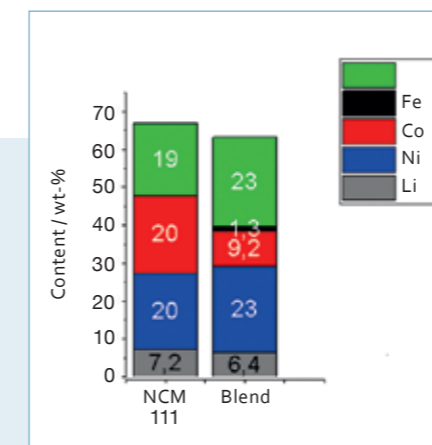
Das Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Programms Batterie 2020 gefördert.

// Water-based production of low-cobalt cathodes

A consortium of industrial partners and ZSW are working on significantly improving the performance, cost and environmental friendliness of high-energy lithium-ion cells within the joint Oekobat-2020 project. The project is strongly geared towards upscaling production to achieve the large-scale and economical manufacture of lithium-ion batteries in Germany. Improved graphites have enabled high-density anodes to be produced in a water-based process. On the cathode side, materials with a high energy density, high current-carrying capacity and high thermal safety were combined to form so-called blend electrodes. Nickel-rich lithium-nickel-cobalt manganese oxide (NCM) and the cobalt-free materials lithium manganese spinel (LMO) and lithium manganese iron phosphate (LMFP) were used for this purpose.

Compared with conventional NCM cathodes for high-energy applications, the capacity at high currents was significantly increased and the thermal safety extended to higher temperatures. In addition, the proportion of the toxic, expensive and, depending on the origin, ethically questionable element cobalt was halved, and the raw material costs of the cathode-active material were reduced by 35% (see fig. below). After nearly two years of research, the production of demonstrator cells is now ready to begin with a higher power density, greater safety, improved lifecycle assessment and lower costs in the PHEV-1 format. These cells will then be tested in an aged condition in stationary storage facilities as part of a recycling concept.

The project is being funded by the German Federal Ministry of Education and Research as part of its Battery 2020 programme.



// Elementanteile im Kathodenaktivmaterial.
NCM 111 im Vergleich mit Blend (NCM 523, LMO, LMFP).
// Elemental composition of the cathode active material.
NCM 111 compared with blend (NCM 523, LMO, LMFP).



„E-Mobilität und erneuerbare Energien erfordern neue Energiespeichersysteme. Wir bilden die komplette Wertschöpfungskette vom Pulver bis zur fertigen Zelle ab und können dadurch einen wichtigen Beitrag leisten.“

// Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens, Head of Department
E-mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-612

“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.”

// Alice Hoffmann
E-mail: alice.hoffmann@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-558



// Kobaltfreie Materialien entwickeln

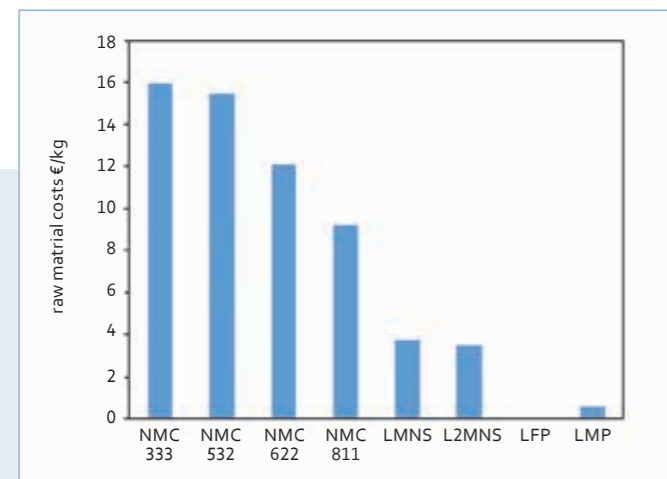
// Development of cobalt-free materials

Das ZSW koordiniert seit Mitte 2013 ein Exzellenz-Zentrum für Batterieforschung, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung innerhalb der Förderinitiative „Excellent Battery“ gefördert wird. Im Projekt „Li-EcoSafe“ forschen insgesamt mehr als 20 Wissenschaftler des ZSW, der Universität Ulm, des Helmholtz-Instituts Ulm (HIU) und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) gemeinsam daran, Lithium-Ionen-Batterien effizienter, kostengünstiger und sicherer zu machen.

Since the middle of 2013, ZSW has coordinated an Excellence Centre for Battery Research, which is being funded by the German Federal Ministry of Education and Research as part of its Excellent Battery research initiative. In the Li-EcoSafe project, more than 20 scientists from ZSW, Ulm University, the Helmholtz Institute Ulm (HIU) and the German Aerospace Centre (DLR) are working together to make lithium-ion batteries more efficient, cheaper and safer.

Der Fokus des ZSW liegt auf der Entwicklung leistungsstarker, sicherer Materialien aus langfristig verfügbaren Rohstoffen. Die Kosten von Lithium-Ionen-Batterien werden im Wesentlichen durch die verwendeten Materialien mitbestimmt, wobei das heute verwendete Kathodenmaterial den größten Einzelanteil an den Gesamtkosten der Zelle hat. Für Hochenergiebatterien werden als Kathodenmaterial Schichtoxide der Klasse $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt, die zwischen 10 und 33 Molprozent Kobalt enthalten. Die Versorgungssicherheit mit Kobalt wird inzwischen als sehr kritisch eingestuft. Die Entwicklung alternativer kobaltfreier Kathodenmaterialien ist daher dringend notwendig. Im Rahmen des Vorhabens LiEcoSafe wurde am ZSW auf der Basis von $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ ein kobaltfreies Kathodenmaterial mit hervorragenden Eigenschaften in Bezug auf Energie- und Leistungsdichte sowie Sicherheit entwickelt und in Vollzellen evaluiert. Durch gezielte Einstellung der Lithiumstöchiometrie gelang es, lithiumreiche Hochvoltspinnelle zu entwickeln, die bis zu 250 mAh/g reversible Kapazitäten mit sehr guter Langzeitstabilität zeigen. Mit der Hochskalierung dieser Materialien in den Kilogramm-Bereich wurde begonnen.

ZSW is focussing on the development of high-performance, safe materials using sustainable raw materials. The cost of lithium-ion batteries is largely determined by the materials deployed, whereby the cathode material currently used accounts for the largest single share of the cell's total cost. For high-energy batteries, the cathode material consists of layered oxides in the $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ class that have different compositions containing between 10 and 33 mole per cent cobalt. Cobalt's supply security is now considered to be very critical. The development of alternative cobalt-free cathode materials is therefore urgently needed. As part of the LiEcoSafe project, a cobalt-free cathode material based on $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$, which has outstanding energy density, power density and safety properties, was developed at ZSW and evaluated in full cells. By specifically adjusting the lithium stoichiometry, it was possible to develop lithium-rich high-voltage spinels that show up to 250 mAh/g reversible capacities with very good long-term stability. The up-scaling of these materials into the kg range has begun.



// Kobaltfreie Materialien können die Kosten für Lithium-Ionen-Batterien wesentlich senken.
 // Cobalt-free materials can significantly reduce the cost of lithium-ion batteries.

// Dr. Peter Axmann
 E-mail: peter.axmann@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-404

// Performance siliziumbasierter Elektroden in Prototypen-Pouch-Zellen

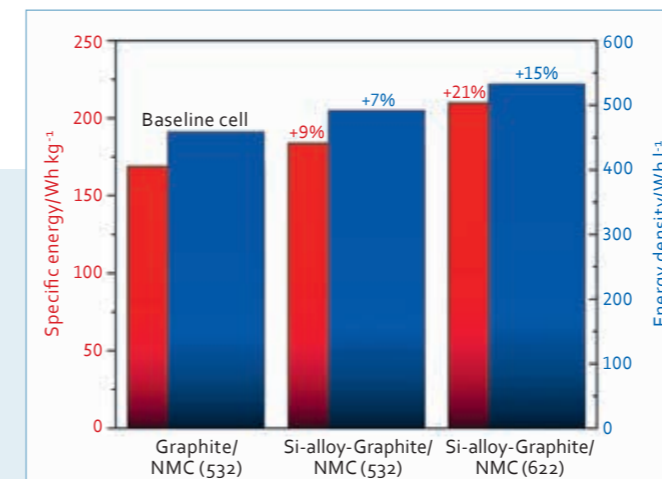
// Performance of silicon-based electrodes in prototype pouch cells

Siliziumbasierte Legierungen (ca. 1.100 mAh/g) und nickelreiche Lithium-Übergangs-Metall-Schichtoxide sind vielversprechende Elektrodenmaterialien für die nächste Generation von Lithium-Ionen-Batterien. Für den praktischen Einsatz dieser Materialien in realen Vollzellen sind allerdings noch einige Hürden zu überwinden. Eine der größten Herausforderungen ist die Realisierung von siliziumbasierten Elektroden mit hohen Flächenbelastungen im großen Maßstab.

Silicon-based alloys (approximately 1,100 mAh/g) and nickel-rich lithium transition metal layer oxides provide highly promising electrode materials for the next generation of lithium-ion batteries. However, there are still a number of hurdles that need to be overcome before these materials can be used in practical terms in real full cells. One of the biggest challenges is the realisation of silicon-based electrodes with large area loads on a large scale.

Im Rahmen eines von der Europäischen Kommission geförderten Projekts „FiveVB“ mit internationalen Partnern aus Industrie und Wissenschaft wurde am ZSW eine Siliziumlegierung mit Graphit-Elektrode bis in den Pilotmaßstab entwickelt. Für die Elektrodenformulierung wurden wasserlösliche Binder verwendet. Die im Pilotprozess hergestellten Elektroden mit hohem Siliziumanteil und hoher Flächenkapazität (4 mAh/cm²) zeichnen sich durch eine bemerkenswert hohe mechanische Stabilität und gute elektrochemische Performance aus. Diese Komposit-Elektroden wurden mit den von den Industriepartnern bereitgestellten neuen Kathodenmaterialien $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ($x+y+z=1$) zu Kathoden mit verschiedener Stöchiometrie und verschiedenen Elektrolyten in Vollzellen kombiniert. Dafür wurden zwei Generationen von Kathodenmaterialien im Pilotmaßstab verarbeitet. Im Vergleich zum Referenzsystem mit Graphit-Anode und NMC-532-Kathode konnten durch die Optimierung der Elektrodenauslegung, Mikrostruktur und Balancierung Prototypzellen mit hoher Zyklenstabilität sowie exzellenter Leistung bei gleichzeitiger Erhöhung der spezifischen Energie um +21% und der Energiedichte um 15% hergestellt werden (s. Abb. unten).

As part of the FiveVB project funded by the European Commission, which is being conducted in conjunction with international partners from industry and science, ZSW developed a silicon alloy with graphite electrode to the pilot scale. Water-soluble binders were used for the electrode formulation. The electrodes with a high silicon content and high capacitance (4 mAh/cm²) feature remarkably high mechanical stability and good electrochemical performance. These composite electrodes were combined with the new cathode materials $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ ($x+y+z=1$) provided by the industry partners to form cathodes with different stoichiometry and electrolytes in full cells. For this purpose, two generations of cathode materials were processed on a pilot scale. Compared with the reference system with a graphite anode and NMC-532 cathode, prototype cells with high cycle stability and excellent performance were successfully produced by optimising the electrode design, microstructure and balancing while increasing the specific energy by +21% and the energy density by 15% (see fig. below).



// ZSW-Prototypenzellen mit Silizium-Legierungsanode und NMC-622-Kathode im Vergleich zum Referenzzellensystem (Graphit|NMC 532).
 // ZSW prototype cells with silicon-alloy anode and NMC 622 cathode compared to the reference cell system (graphite|NMC 532).

// Dr. Mario Marinaro
 E-mail: mario.marinaro@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-212

// Produktionsforschung (ECP) Production Research (ECP)

// Unsere Kernkompetenzen

Die serienmäßige Produktion großer Lithium-Ionen-Zellen, wie sie auch in Elektroautos oder in stationären Speichern verwendet werden, stellt besondere Anforderungen an die Stabilität und Genauigkeit der Prozesse. Je höher deren Qualität und Reproduzierbarkeit werden, desto zuverlässiger, langlebiger und kostengünstiger wird der Speicher.

Im Fokus der Arbeit des Fachgebiets steht der Betrieb einer vorwettbewerblichen „Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL)“, die den seriennahen Gesamtproduktionsprozess für Hardcase-Zellen abbildet (PHEV-1-Zellen, > 25 Ah). Hierbei stehen Untersuchungen zum Zusammenspiel von Zellchemie, Zelldesign und Herstelltechnologie in Bezug auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten sowie Fragen zu Inline-Sensorik, zu Fertigungstoleranzen oder zu kosteneffizienten Abläufen im Zentrum. Bei neuen Materialien und Komponenten geht es um Fragen zur Evaluierung von Verarbeitbarkeit und Qualität im industrierelevanten Maßstab.

Kernaufgabe des ECP-Teams ist es, im Rahmen von Industrieaufträgen und Forschungsvorhaben industrielle Produktionsprozesse zu optimieren oder fortschrittliche Zellchemie in Musterserien von Standardzellen zu verifizieren. Die Forschungskompetenz umfasst alle produktionsnahen Fragestellungen, von der Anlagenentwicklung über die Verbesserung von Einzelschritten bis zu den Qualitätssicherungsverfahren. Des Weiteren verfügt das Team durch mehrjährigen Betrieb der Pilotanlage über wichtige Beratungskompetenz bezüglich Zellen und Kostenbetrachtungen.

// Our main focus

The series production of large lithium-ion cells, such as those used in electrical vehicles or stationary storage systems, has particular demands on the reliability and precision of the processes. The higher their quality and reproducibility, the greater the reliability, durability and cost-effectiveness of the storage systems.

The work focusses on operating a pre-market “Research platform for industrial production of lithium-ion cells (FPL)”, which maps the near-production overall manufacturing process for hard-case cells (PHEV-1 cell, >25 Ah). This focusses on studies of the interaction of cell chemistry, cell design and manufacturing technology in terms of quality, reliability and manufacturing costs as well as inline sensors, manufacturing tolerances and cost-efficient workflows. With new materials and components, the goal is to evaluate usability and quality at an industrial scale.

The main responsibility of the ECP team is to optimise industrial production processes as part of industrial orders and research projects or verify advanced cell chemistry in sample series of standard cells. Research expertise covers all production-related aspects, from system development to improving all production steps, right up to quality assurance processes. Furthermore, the highly qualified and experienced team has crucial consulting expertise in regard to cell manufacturing and cost considerations based on the operation of the pilot system.



// PHEV-1-Funktionsmuster mit unterschiedlichen Deckelbaugruppen.
// PHEV-1 function model with different cover assemblies.

// Herstellprozess für PHEV-1-Zellen mit neuem Gehäusedesign

In diesem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt werden gemeinsam mit Industriepartnern optimierte Design- und Produktionskonzepte für die Fertigung von Lithium-Ionen-Batterie-Gehäusen untersucht. Zunächst wurden die Kostentreiber bei der Fertigung von Zellgehäusen identifiziert und auf Wirtschaftlichkeit optimiert. Begleitend wurden Materialprüfungen durchgeführt, um die Materialverträglichkeit innerhalb der Zelle abzusichern. Daneben war das ZSW beratend an der Erstellung neuer Gehäusekonzepte beteiligt.

Die entwickelten Konzepte wurden auf der vollautomatischen Assemblie-Linie an der ZSW-Forschungsplattform für die industrielle Produktion von großen Lithium-Ionen-Zellen (FPL) unter seriennahen Bedingungen untersucht und das PHEV-1-Gehäusekonzept erfolgreich weiterentwickelt. Das neue Zellgehäuse zeigt sich in Produktionskennzahlen (Durchsatz, Ausschuss) mit dem Gehäusekonzept vergleichbar, das bereits im Rahmen eines Referenzprojektes entwickelt und ausgiebig qualifiziert wurde. Sie unterscheiden sich vorrangig durch ihr thermisches Verhalten in der Zyklierung (s. Abb. unten). Dabei wurde eine geringere Streuung und ein generell niedrigeres Temperaturniveau an den Kupfer-Terminals festgestellt. So konnte im Vergleich zur Referenzzelle der FPL ein Zelldesign validiert werden, bei dem die stärksten Kostentreiber in den Gehäusekomponenten – und damit der Zelle – ersetzt wurden.

// Manufacturing processes for PHEV-1 cells with a new housing design

In this project, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research, optimised design and production concepts for producing lithium-ion battery housings are being investigated together with industrial partners. The cost drivers in the manufacture of cell casings were first of all identified and optimised for cost-effectiveness. Accompanying material tests were carried out to ensure the material compatibility within the cell. In addition, ZSW was also involved in the development of new housing concepts.

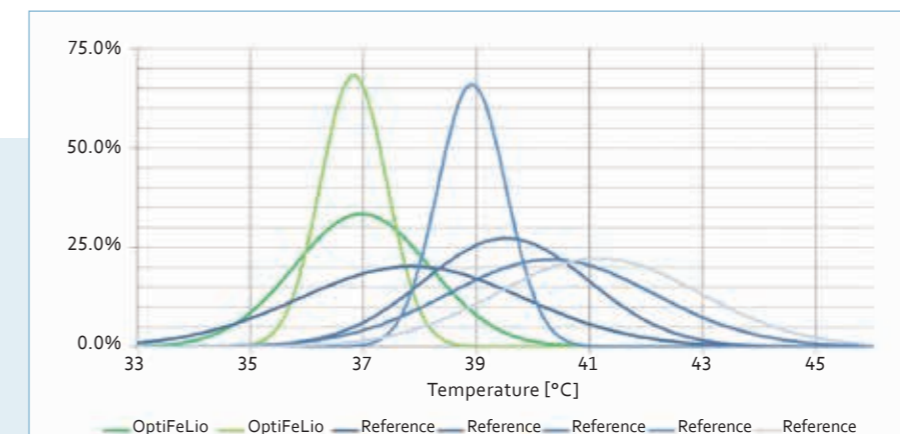
Using the fully automated assembly line at ZSW's research platform for the industrial production of large lithium-ion cells (FPL), the developed concepts were investigated under close-to-production conditions and the PHEV-1 housing concept was successfully developed further. The new cell housing's production figures (throughput and rejection rates) are comparable with the one developed and extensively qualified as part of the reference project. They differ primarily due to their thermal behaviour in the cyclisation (see fig. below). Less scattering and a generally lower temperature level at the copper terminals were detected. In contrast to the FPL reference cell, it was possible to validate a cell design in which the major cost drivers amongst the housing components – and consequently the cell – were replaced.



„Mit der Forschungsplattform stellen wir unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft eine flexible und prozesssichere Testumgebung für gemeinsame Projekte zur Batteriezellproduktion zur Verfügung.“

// Dr. Wolfgang Braunwarth, Head of Department
E-mail: wolfgang.braunwarth@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-562

“With the research platform, we can now provide our partners from industry and science with a flexible, process-reliable test environment for joint battery cell production projects.”



// Zell-Performance der PHEV-1-Zellen mit neuem Gehäuse.
// Cell performance of PHEV-1 cells with new housing.

// Stefan Rössler
E-mail: stefan.roessler@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-349

// Akkumulatoren (ECA)

Accumulators (ECA)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet untersucht und entwickelt elektrochemische Energiespeichersysteme. Damit Akkumulatoren auch unter schwierigsten Bedingungen sicher und leistungsfähig sind, stehen deren Charakterisierung unter verschiedenen Betriebsbedingungen, die Untersuchung des Verhaltens bei Fehlbedienung oder in Unfallsituationen sowie die Entwicklung von Methoden des Batteriemagements im Mittelpunkt der 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 Belastungen im Grenzbereich oder zerstörerischer Tests werden die Reaktionen und Gefahrenpotenziale von Akkumulatoren bei extremen Schädigungen sowie ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber verschiedenen Missbrauchsbedingungen und Fehlbedienung beurteilt. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Unterdrückung der Fehlerausbreitung im System (Propagation) und die Brandlöschung bzw. Brandkontrolle.

Batteriesystemtechnik

Herzstück der Batteriesystemtechnik ist die thermische und elektrische Modellierung sowie die Simulation von Zellen und Batteriesystemen. Erforscht werden modellbasierte Algorithmen zur Zustandsbestimmung (Ladezustand und Alterung), zur Vorhersage der Systemleistungsfähigkeit, zur optimalen Laderegulierung, insbesondere unter Schnellladebedingungen und zum Energiemanagement. Der Einfluss von externen Parametern wie Rippleströme oder mechanische Kompressionskräfte auf die Performance und Lebensdauer wird untersucht. Ziel ist ein dynamischer, zuverlässiger und wirtschaftlicher Betrieb des Speichers.



„Im eLaB erforschen, testen und untersuchen wir Batterien und Systeme flexibel, normgerecht und innovativ.“

// Dr. Harry Döring, Head of Department
E-mail: harry.doering@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-506

// Our main focus

The department researches and develops electrochemical energy storage systems. To ensure that accumulators are safe and efficient even under the most extreme conditions, our work focusses on characterising them under various operating conditions, investigating their behaviour with operational errors and accident situations as well as developing battery management methods. The batteries can be used as stationary energy storage in electrical networks and portable devices as well as in electrified drive trains for e-mobility.

Battery and safety tests

The electric battery test is used to test the functionality of cells, modules and systems, measure their performance and determine their expected service life under defined loads and environmental conditions. Boundary loads or destructive tests are used to assess the reactions of the batteries and potential dangers posed by them in the event of extreme damage as well as their resistance to various abusive conditions and operational errors. One focus here is on suppressing the propagation of failures throughout the entire battery and how to extinguish or control a battery fire.

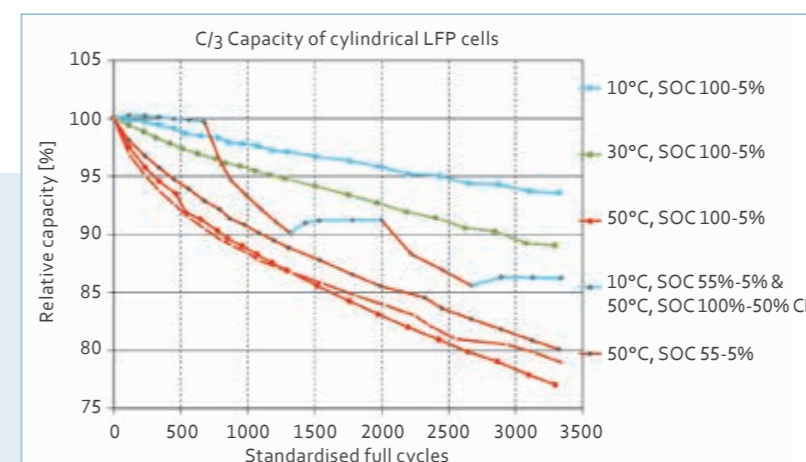
Battery system technology

The centrepiece of the battery system technology comprises the thermal and electrical modelling as well as the simulation of cells and battery systems. The department is researching model-based algorithms in order to determine the battery state (state of charge and ageing), predict the system performance, ensure optimal charge control – especially under fast-charging conditions – and improve the energy management. The influence of external parameters such as ripple currents or mechanical compression forces is being investigated in regard to the performance and service life. This is aimed at ensuring the dynamic, reliable and efficient operation of the storage system.

// Sicherheitsaspekte von Solar-Heimspeichern

Mit der wachsenden Verbreitung von Solar-Heimspeichern mit Lithium-Ionen-Batterien sind die Untersuchungen zur Sicherheit der Speicher, der Installationsumgebung, zur Zuverlässigkeit und Störsicherheit des Batterie- und Energiemanagementsystems sowie zur Eigensicherheit der verbauten Batteriezellen zunehmend von Bedeutung. Unter den Bedingungen der Installation von Batteriespeichern in Wohngebäuden ist die Eigensicherheit derartiger Speicher von allerhöchster Wichtigkeit. Im Rahmen von zwei vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Verbundprojekten, „Sicherheit und Netzdienlichkeit von elektrischen Heimspeichersystemen mit Lithium-Ionen-Batterien“ und „Sicherheit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen mit Speichersystemen“, werden die Alterungseigenschaften und das Missbrauchsverhalten der Batterien in Heimspeichern untersucht.

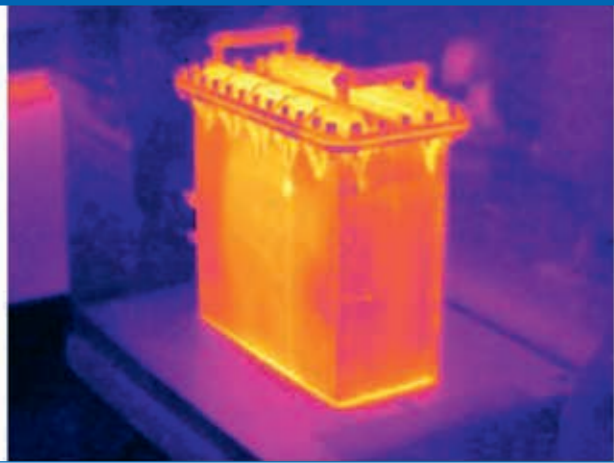
Die Untersuchung der Umgebungs- und Belastungsbedingungen zeigen gravierenden Einfluss auf die Lebensdauer und sinnvolle Nutzungsdauer von Batteriespeichern mit Lithium-Ionen-Batterien. Die Abbildung unten zeigt den Einfluss der Betriebstemperatur des Speichers mit LFP-Zellen (Lithium-Eisen-Phosphat) sowie das Nutzungsband in Bezug auf den Ladezustand bzw. die Entladetiefe. Der Einfluss der Betriebstemperatur ist dabei der stärkste Faktor (Beschleunigung des Kapazitätsverlustes mit wachsender Temperatur). Am deutlichsten wird das bei einem simulierten alternierenden „Sommer-Winter-Betrieb“ mit stagnierendem bzw. reagierendem Kapazitätsverlauf bei niedrigen Temperaturen und erneut hohem Kapazitätsverlust bei erhöhten Temperaturen (blau-rote Linie). Zudem wirkt sich das Betriebsband des Ladezustands auf die Alterung aus.



// Verlauf des Kapazitätsverlusts in Abhängigkeit von der normierten Zyklenzahl bei verschiedenen Betriebsbedingungen (in Rot).

// The capacity loss process as a function of the normalised number of cycles under different operating conditions (in red).

// Joaquín Klee Barillas
E-mail: joaquin.klee-barillas@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-536



© Daimler AG

// Oberflächentemperatur des Autoklav ohne (links) und mit (rechts) thermischer Isolierung.
 // Surface temperature of the autoclave without (left) and with (right) thermal insulation.

// Thermische Analyse großer Batterien

Neben der Performance von Batterien werden im Rahmen verschiedener Projekte auch die Sicherheitsrisiken von Batteriespeichern untersucht. Dazu wurde am ZSW in den vergangenen Jahren eine umfangreiche Infrastruktur aufgebaut, die verschiedene zerstörerische Testarten ermöglichen.

Tests im Autoklav ermöglichen neben der reproduzierbaren Messung von Strömen, Temperaturen und Spannungen auch die Erfassung der Druckentwicklung und damit die Menge der emittierten Gase. Über eine Probenentnahme kann auch die Gaszusammensetzung bestimmt werden. Von besonderem Interesse ist, wie viel Energie insgesamt während einer Zerstörung der Zelle abgegeben wird. Dazu wurde ein weiterer Autoklav umfangreich thermisch isoliert, mit einer Vielzahl von Temperatursensoren ausgestattet und umfangreiche Kalibrierungen ausgeführt. Mit diesem Autoklav können jetzt auch Zellen bis zu 10 Ah vermessen werden. Durch das verbesserte Integrations-Auswerteverfahren können die Versuchszeiten jetzt von ca. zwölf auf ca. drei Stunden verkürzt werden. Die Messungen zeigen, dass die emittierte thermische Energie im Bereich vom 1- bis 2,5-fachen des äquivalenten elektrischen Speichervermögens liegt.

// Thermal analysis of large batteries

In addition to battery performance, the safety risks posed by battery storage systems are also being analysed as part of various projects. To this end, ZSW has built up an extensive infrastructure in recent years that enables various types of destructive testing.

Tests in an autoclave make it possible to measure reproducible currents, temperatures and voltages as well as detect the pressure development and thus the amount of emitted gases. The gas composition can also be determined by taking a sample. Of particular interest is how much energy is released by the cell during destruction. For this purpose, another autoclave was extensively thermally insulated and equipped with a large number of temperature sensors, and extensively calibrated. Cells up to 10 Ah can also now be measured with this autoclave. Thanks to the improved integration evaluation process, the test times can now be shortened from approximately 12 to around 3 hours. The measurements revealed that the emitted thermal energy is in the range of 1 to 2.5 times the equivalent electrical storage capacity.

// Schnellladen durch optimierte Ladestromprofile

Die Schnellladefähigkeit von Elektrofahrzeugen ist eine wesentliche Voraussetzung für den kommerziellen Erfolg der Elektromobilität. Nur wenn es gelingt, während kurzer Stopps an der Autobahn einen hinreichenden Energieinhalt für die nächste Etappe nachzuladen, ist ein Einsatz von Elektrofahrzeugen auf der Langstrecke denkbar. Die Herausforderungen, denen sich die Batterie- und Fahrzeughersteller stellen müssen, lassen sich an den Regularien des California Air Resources Board (CARB) für die Vergabe von Zero Emission Vehicle (ZEV) Credits ablesen: Die volle Anzahl an ZEV-Credits erhält ein Fahrzeug, wenn es maximal 15 Minuten benötigt, um eine elektrische Reichweite von 285 Meilen (459 km) nachzuladen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist noch eine Reihe von Fragen zu klären, z. B. bezüglich der Alterung von Batterien durch entsprechende Schnellladungen.

Im Rahmen eines von der Vector Stiftung geförderten Projekts wurden Alterungsuntersuchungen mit 20 verschiedenen Ladestromprofilen an 22 Zellen durchgeführt (s. Abb. unten). Dabei wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung eingesetzt, um gezielt bestimmte Charakteristika des Ladestromprofils zu variieren. Diese Variationen betreffen beispielsweise die Überlagerung von Wechselströmen beim Laden, das Aufbringen von Reverse-Pulsen sowie eine durch bekannte Elektroden Eigenschaften motivierte Profilform. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden sowohl die Ladedauer als auch die in dieser Zeit eingebrachte Lademenge (entsprechend einer Ladung von 0 bis 80% SOC) für alle getesteten Zellen gleich gewählt.

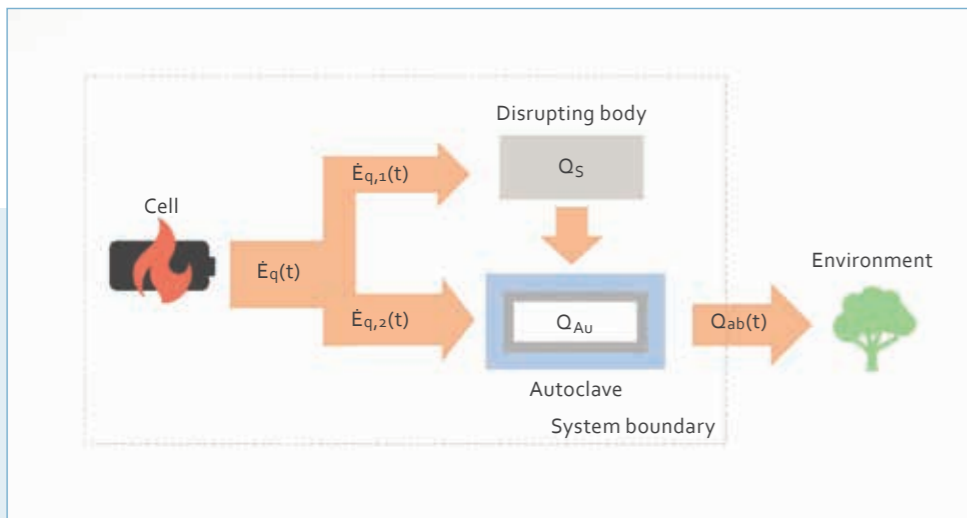
Im Ergebnis zeigt sich eine massive Abhängigkeit der Lebensdauer vom Ladeprofil, insbesondere besteht großes Potenzial zur Verbesserung gegenüber der klassischen Konstantstromladung (CC). Die systematische Optimierung des Ladestromprofils birgt großes Potenzial zur Verbesserung der Schnellladefähigkeit von Elektrofahrzeugen und ist deshalb von besonderem industriellem Interesse.

// Fast charging using optimised charging current profiles

The rapid charging capability of electric vehicles is an essential prerequisite for the commercial success of electromobility. It will only be possible to use electric vehicles on long-haul routes if sufficient energy can be recharged for the next stage during short stops on the motorway. The challenges faced by battery and vehicle manufacturers are reflected in the California Air Resources Board (CARB) regulations for awarding Zero Emission Vehicle (ZEV) credits: a vehicle is awarded full ZEV credits if it takes no more than 15 minutes to recharge an electric range of 285 miles (459 km). There are still a number of questions to be answered, e.g. regarding the ageing of the batteries due to fast charging.

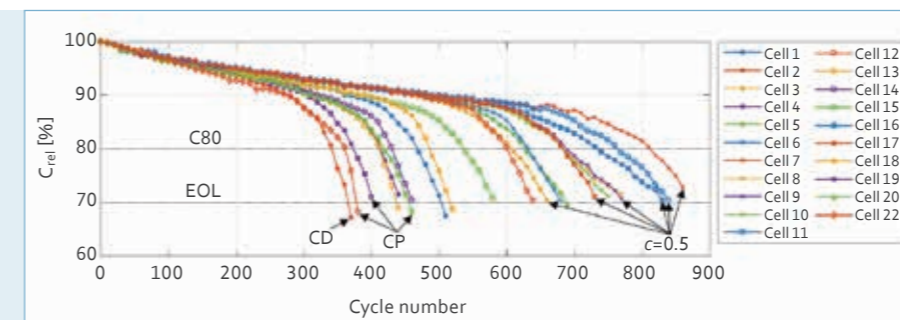
As part of a project funded by the Vector Foundation, ageing studies with 20 different charge current profiles on 22 cells have been carried out (see fig. below). The method of statistical experimental design was used to selectively vary certain characteristics of the charging current profile. These variations concern, for example, the superimposition of alternating currents during charging, the application of reverse pulses, as well as a profile shape motivated by known electrode properties. In order to ensure the comparability of the results, both the charging time and the amount of charge introduced during this period (corresponding to a charge of 0 to 80% SOC) were chosen to be the same for all cells tested.

This revealed that the service life is massively dependent on the charging profile. In particular there is considerable potential for improvement relative to standard constant current charging (CC). The systematic optimisation of the charge current profile offers considerable potential for improving the fast charging capability of electric vehicles and is therefore of particular interest for industry.



// Energieflussschema bei der Bewertung der Energiefreisetzung im Autoklav.
 // Energy flow scheme for evaluating the energy released in the autoclave.

// Michael Würz
 E-mail: michael.woerz@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-505



// Kapazitätsdegradation während der Zyklierung mit verschiedenen Ladestromprofilen.
 // Capacity degradation during cyclisation with different charging current profiles.

// Dr. Marius Bauer
 E-mail: marius.bauer@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-588

// Brennstoffzellen Grundlagen (ECG)

Fuel Cell Fundamentals (ECG)



// Unsere Kernkompetenzen

Emissionsfreie Mobilität und Speicherung großer Energiemengen über längere Zeiträume sind wesentliche Herausforderungen in einer auf fluktuierender Stromerzeugung basierenden Energiewirtschaft. Die im Fachgebiet ECG verfolgten Forschungsthemen zu Elektroden für Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen, Hochleistungsspeichern sowie Metall-Luft-Systemen und neuen Elektrodenstrukturen für die Wasserelektrolyse bieten Lösungsansätze für die genannten Herausforderungen.

Die Entwicklungen am ZSW zu Komponenten für PEM-Brennstoffzellen erstrecken sich von der Elektrode bis zur Bipolarplatte. Das Fachgebiet ECG beschäftigt sich mit den Prozessen in der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) sowie mit der Elektroden- und Katalysatorentwicklung. Ein Thema hierbei sind neue, oxidationsstabile Katalysatorträgermaterialien. Diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten helfen beim Verständnis grundlegender Fragen zur Elektrodenstabilität.

Hochleistungsspeicher mit wässrig-alkalischen Elektrolyten eignen sich, um elektrische Spitzenlasten abzudecken. Ihre Leistungs- und Energiedichte konnte durch beschichtete, nanoporöse Nickel-Trägermaterialien mit Nickelhydroxid weiter gesteigert werden und übertrifft mittlerweile heutige Superkondensatoren. Zyklenfeste Metall-Luft-Zellen erfordern formstabile und korrosionsstabile Elektroden. Mit spezifischen Elektrodenadditiven konnten der Ladewirkungsgrad und die Zyklenfestigkeit der Zinkelektrode und der bifunktionellen Sauerstoffelektrode verbessert werden. Die verwendete Elektrodentechnologie kann auch zur Wasserelektrolyse eingesetzt werden.

Das Team verfügt über langjährige Erfahrung und die nötige Infrastruktur, neue technologische Ansätze aufzugreifen und schnell im Labor zu verifizieren und demonstrieren.

// Our main focus

Emission-free mobility and the storage of large amounts of energy over prolonged periods of time are major challenges in an energy industry based on intermittent electricity generation. The research topics pursued in the ECG department, relating to electrodes for polymer electrolyte membrane fuel cells, high-performance storage systems as well as metal-air systems and new electrode structures for water electrolysis, offer solutions to the aforementioned challenges.

At ZSW, PEM fuel cell component developments range from the electrode to the bipolar plate. The ECG department is working on processes within membrane electrode assembly (MEA) as well as electrode and catalyst development. One of the topics is innovative, oxidation-resistant catalyst support materials. These research and development activities help in understanding fundamental issues for electrode stability.

High-performance storage devices with aqueous-alkaline electrolytes are used to cover electrical peak loads. The performance and energy density was successfully further increased using coated, nano-porous nickel support materials with nickel hydroxide, thus surpassing current supercapacitors. Cycle-resistant metal-air cells require dimensionally stable and corrosion-resistant electrodes. The use of specific electrode additives improved the charging efficiency and cycle stability of both the zinc electrode and the bifunctional oxygen electrode. The electrode technology used for this purpose can also be successfully utilised for water electrolysis.

The team has many years of experience and has the necessary infrastructure to adopt and quickly verify and demonstrate new technological approaches in the laboratory.



„Wir forschen und entwickeln, um neue Materialien und Komponenten für Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Hochleistungsspeicher und Metall-Luft-Zellen bereitstellen zu können.“

// Dr. Ludwig Jörissen, Head of Department
E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-605

“We research and develop new materials and components for fuel cells, electrolysers, high-capacity storage systems and metal-air cells.”

// 100-kW-Brennstoffzellenstack für den Fahrzeugantrieb

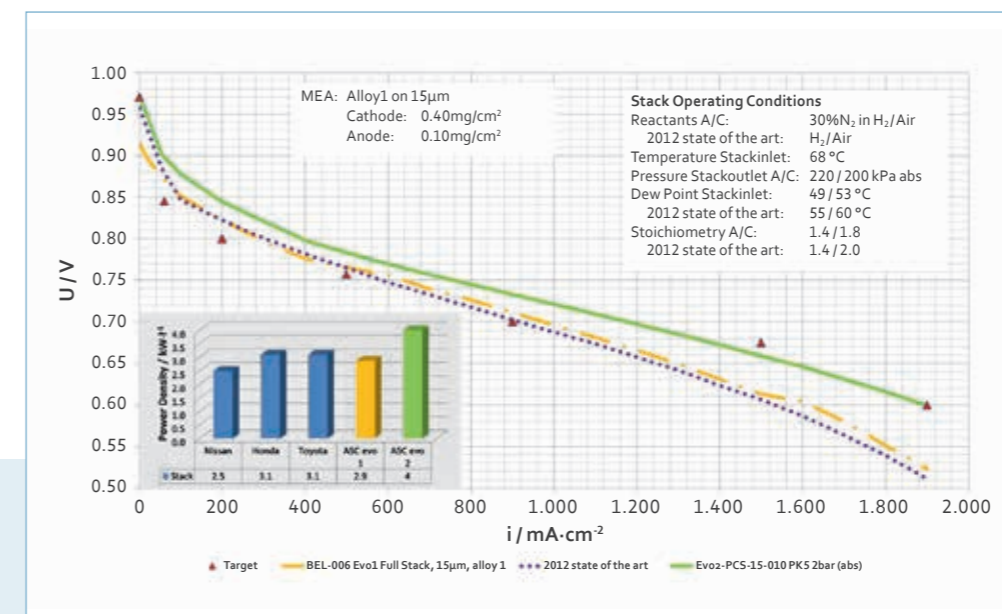
Das vom ZSW koordinierte europäische Verbundprojekt AutoStack-CORE (ASC) wurde erfolgreich abgeschlossen. Im Projektverlauf wurde in zwei Designschleifen ein Stack-Funktionsmuster für Fahrzeugantriebe mit einer Leistungsdichte von mehr als 4 kW l^{-1} (s. Abb. unten) bei Spitzenlast entwickelt und damit das Projektziel „to provide top of its class European stack technology“ erreicht. Dauertests über mehr als 3.500 Stunden zeigen Potenziale für eine geeignete Standfestigkeit auf. Eine unabhängige Kostenstudie zeigte für das konkrete Design vergleichbare Kosten, wie sie vom U.S. DoE für vergleichbare Stückzahlen mit 30.000 Einheiten p.A. berichtet werden.

Ein Schlüsselement für den Erfolg war die enge Kooperation der 14 Partner aus Industrie und Forschung über die gesamte Wertschöpfungskette. Das Vorhaben wird in dem über das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) geförderten Projekt AutoStack-Industrie (ASI) mit zehn Partnern weitergeführt.

// 100-kW fuel cell stack for vehicle propulsion

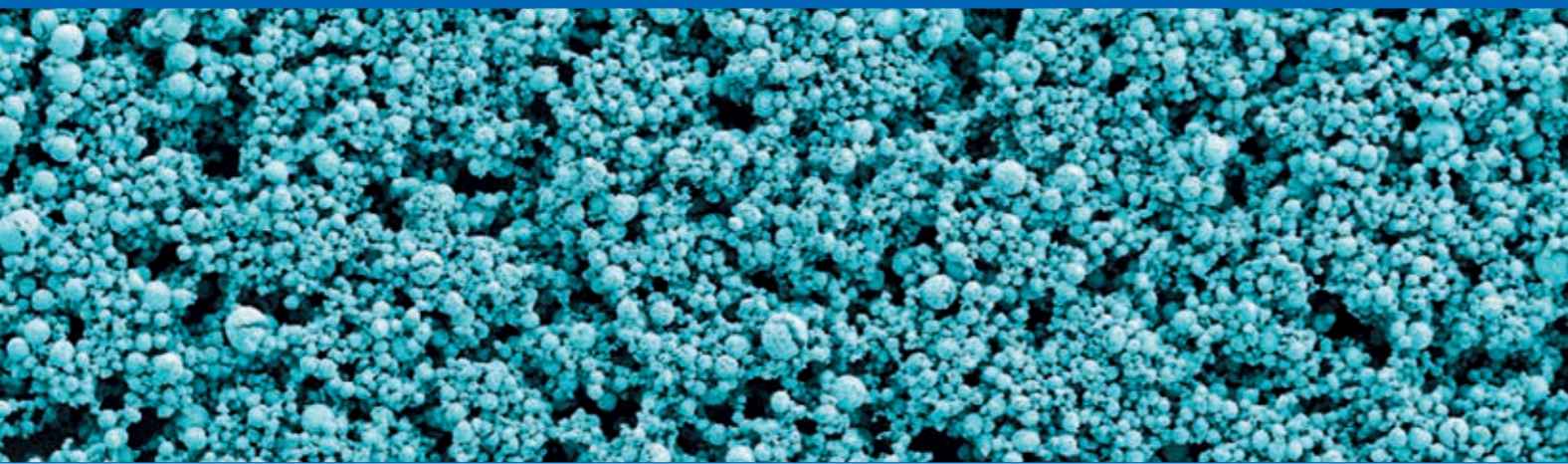
The AutoStack-CORE (ASC) European joint project, which was coordinated by ZSW, has now been successfully completed. In the course of the project, a functional model stack with a power density of more than 4 kW l^{-1} (see fig. below) at peak load was achieved in two design stages, thus meeting the project goal “to provide top-of-its-class European stack technology”. Endurance tests lasting more than 3,500 hours show potential for achieving suitable stability. An independent cost study showed that the costs of the specific design are comparable to the costs reported by the US Department of Energy for similar quantities with 30,000 units.

A key element for the success of the project was the close collaboration between the 14 partners from industry and research across the entire value chain. The project will be continued with 10 partners, in the AutoStack-Industrie (ASI) project, funded by the National Innovation Programme Hydrogen and Fuel Cell Technology (NIP).



// Die Leistungsdichte des ASC-Brennstoffzellenstacks konnte auf über 4 kW l^{-1} gesteigert werden.
// The power density of the ASC fuel cell stack could be increased to more than 4 kW l^{-1} .

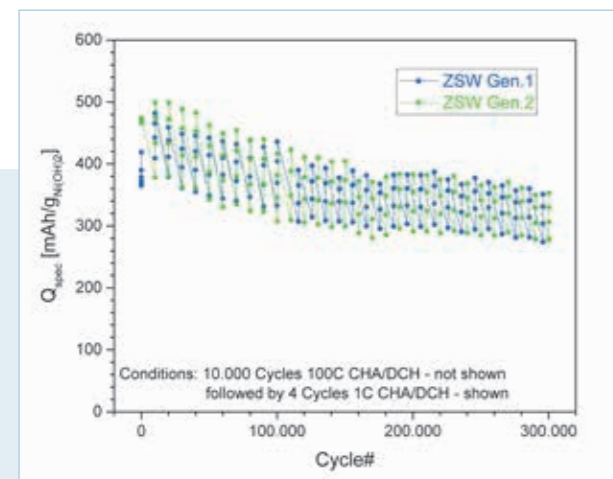
// Dr. Ludwig Jörissen
E-mail: ludwig.joerissen@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-605



// Leistungsstarke alkalisch-wässrige Hochleistungsbatterien

Doppelschichtkondensatoren (DLC) werden heutzutage millionenfach eingesetzt, um elektrische Spitzenleistungen (10 kW/kg) zur Verfügung zu stellen. Beispiele hierfür sind der Einsatz in Windkraftanlagen und in automobilen Anwendungen zur Stabilisierung des Bordnetzes. Die geringe Energiedichte von kommerziellen Doppelschichtkondensatoren begrenzt jedoch ihre weiteren Einsatzmöglichkeiten. Während die Industrie seit einigen Jahren versucht, die Energiedichte von DLCs durch Spannungserhöhung weiter zu steigern, hat das ZSW einen alternativen Weg eingeschlagen.

Aufgrund der geringen Kapazitäten der Aktivkohlenstoffe im Bereich von 50 mAh g⁻¹ in kommerziellen DLCs bestehen enorme Potenziale durch deren Austausch mit hochleistungsfähigen Batteriematerialien. Das vom ZSW eingesetzte Ni(OH)₂ hat eine spezifische Kapazität von etwa 400 mAh g⁻¹ und angepasste Aktivkohlenstoffe von 150 mAh g⁻¹. Das Ni(OH)₂ wurde auf nanostrukturierten Ableitelektroden abgeschieden und ermöglichte neben der hohen spezifischen Kapazität eine extrem hohe Leistungsfähigkeit. Entladungen bis zu drei Sekunden konnten ohne signifikanten Kapazitätsverlust realisiert werden. Die hohen spezifischen Kapazitäten der Aktivmaterialien überkompensieren den Rückgang der Zellspannung in alkalisch-wässrigen Elektrolyten in der Generation 2 (Gen2) der am ZSW entwickelten Hochleistungsbatterien um ein Vielfaches. Daher konnten Zellen hergestellt werden, die bei einer Leistung von 10 kW kg⁻¹ noch eine Energiedichte von 9,5 Wh kg⁻¹ aufwiesen. Die ZSW-Zellen zeigten nach 300.000 Zyklen noch 72 % der initialen Kapazität (s. Abb. unten).



// Zyklusalterung asymmetrischer Ni(OH)₂-Kondensatoren.
// Cycle ageing of asymmetric Ni(OH)₂ capacitors.

// Dr. Olaf Böse
E-mail: olaf.boese@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-615

// Second generation of alkaline aqueous high-performance batteries

These days, millions of double-layer capacitors (DLCs) are used to provide peak (10 kW/kg) electrical power. These are deployed, for example, in wind turbines and automotive applications to stabilise the electrical system. However, the low energy density of commercial double-layer capacitors limits their further potential applications. Whilst industry has been trying in recent years to further increase the energy density of DLCs by increasing the voltage, ZSW has taken an alternative approach.

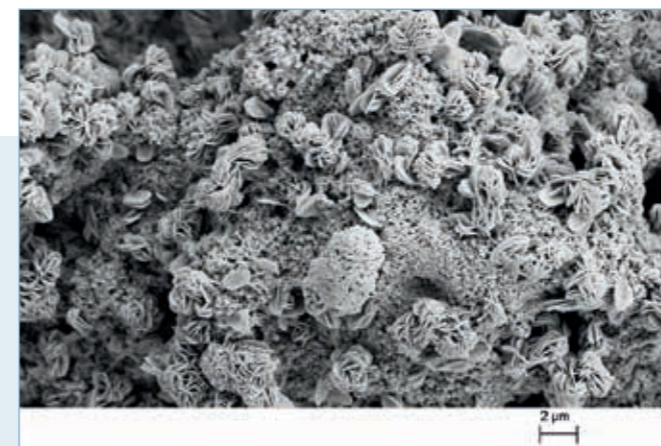
Due to the low capacities of activated carbons in the 50 mAh g⁻¹ range in commercial DLCs, enormous potential is offered by replacing them with high-performance battery materials. The Ni(OH)₂ used by ZSW has a specific capacity of about 400 mAh g⁻¹ and adapted activated carbon has 150 mAh g⁻¹. The Ni(OH)₂ was deposited on nanostructured discharge electrodes and, in addition to the high specific capacitance, enabled extremely high performance. Discharges up to three seconds were achieved without significant capacity loss. The high specific capacities of the active materials more than compensate many times over for the decrease in cell voltage in alkaline-aqueous electrolytes in the second generation (Gen2) high-performance batteries developed at ZSW. This therefore enabled cells to be produced that still have an energy density of 9.5 Wh kg⁻¹ at a power of 10 kW kg⁻¹. The ZSW cells still showed 72% of their initial capacity after 300,000 cycles (see fig. below).



// Zink-Luft-Batterien mit hohem Wirkungsgrad

Die zunehmende Netzeinspeisung von Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien erfordert über kurz oder lang den Einsatz neuer Energiespeicher. Zink-Luft-Batterien sind infolge ihrer niedrigen Kosten, hohen Energiedichte und ihres geringen Einflusses auf die Umwelt vielversprechende Kandidaten. Jedoch begrenzen Selbstentladung durch Wasserstoffentwicklung, Dendritenwachstum und Formveränderungen der Elektrode ihren breiten Einsatz. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekt LuZi soll der Einfluss der genannten Phänomene durch umweltfreundliche Additive zur Zink-Elektrode und zum Elektrolyten minimiert werden. Hierzu wurden alternative Komponenten zur Verbesserung des Ladungswirkungsgrads getestet.

Das in Standardelektroden verwendete Bleioxid konnte erfolgreich durch umweltfreundlichere Stoffe wie Zinn-, Wismut- und Indiumoxid ersetzt werden (s. Abb. unten). Carboxymethylcellulose (CMC) ist ein in der Batterieindustrie verbreiteter, kostengünstiger Binder. Bei galvanostatischer Zyklierung zeigten mit CMC gebundene Elektroden geringere Ladespannungen und einen Ladewirkungsgrad von 88 %. Zusätzlich reduziert CMC die Korrosion und unterdrückt das Dendritenwachstum und die Wasserstoffentwicklung. Das elektrochemische Verhalten und die Entwicklung der Elektrodenmorphologie nach Zyklierung mit verschiedenen organischen und anorganischen Elektrolytadditiven wurden mittels Zyklovoltammetrie, Elektronenmikroskopie und Röntgentomographie untersucht. Hierbei lieferten oberflächenaktive Additive wie Triton X100, Tetrabutylammoniumbromid (TBAB), Kaliumcitrat und Polyethylenglykol (PEG6000) die besten Ergebnisse.



// REM-Aufnahme der bleioxidfreien Elektrode für Zink-Luft-Batterien mit Zinn-, Wismut- und Indiumoxid.
// SEM image of the lead-free electrode for zinc-air batteries with tin, bismuth and indium oxide.

// Dr. Camilla Evangelisti
E-mail: camilla.evangelisti@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-207

// Zinc-air batteries with high efficiency

The increasing injection of power from intermittent renewable energy sources into the electricity grid will sooner or later require the use of new energy storage systems. Zinc-air batteries are promising candidates in this regard thanks to their low cost, high energy density and low impact on the environment. However, self-discharging caused by hydrogen evolution, dendrite growth and shape changes to the electrode limit their widespread use. The LuZi project, funded by the German Federal Ministry of Education and Research, is aimed at minimising the influence of these phenomena through using environmentally friendly additives for the zinc electrode and the electrolyte. For this purpose, alternative components for improving the charge efficiency were tested.

The lead oxide used in standard electrodes has been successfully replaced by more environmentally friendly substances such as tin, bismuth and indium oxide (see fig. below). Carboxymethyl cellulose (CMC) is a cost-effective binder common in the battery industry. With galvanostatic cycling, CMC-bonded electrodes showed lower charging voltages and a charging efficiency of 88%. In addition, CMC reduces corrosion and suppresses dendrite growth and hydrogen evolution. The electrochemical behaviour and the development of the electrode morphology following cyclisation with various organic and inorganic electrolyte additives were investigated using cyclic voltammetry, electron microscopy and X-ray tomography. Surface-active additives such as Triton X100, tetrabutylammonium bromide (TBAB), potassium citrate and polyethylene glycol (PEG6000) produced the best results.

// Brennstoffzellen Stacks (ECB)

Fuel Cell Stacks (ECB)

// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ist spezialisiert auf die Entwicklung der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen-(PEMFC-)Technologie. 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 von PEMFC-Komponenten und -Stacks erstreckt sich von wenigen Watt bis zu 100 kW_{el}. Brennstoffzellen können auf Leistung, Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kompaktheit optimiert werden. Das umfasst u. a. die Untersuchung und Prognose von Alterungsprozessen und die Fehleranalyse. Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung von manuellen und automatisierten Herstellertechniken und die Charakterisierung von PEMFC-Komponenten, -Zellen und -Stacks einschließlich automobiltauglicher Brennstoffzellen. Strukturen von Komponenten und Betriebsbedingungen können mittels Modellierung und Simulation der Prozesse in Brennstoffzellen zügig optimiert werden. Das schließt auch die Entwicklung und Etablierung völlig neuer Ansätze mittels modernster Simulationssoftware ein.

Die Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgt an aussagekräftiger Hardware und mit realitätsnahen Experimenten. Beispielsweise wird das Wassermanagement innerhalb der Gasdiffusionselektroden (GDL) und Gasverteilerstrukturen mittels einer μ -CT-Anlage validiert. Mit dieser Anlage können GDL-Strukturen auch unter komprimierten Zuständen einschließlich ihres Wasserhaushalts untersucht werden. Ergänzend stehen mit dem Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB) entwickelte Verfahren zur Neutronen- und Synchrotronradiographie und -tomographie zur Visualisierung von Komponenten, Zellen und Stacks zur Verfügung, deren zeitliche und räumliche Auflösungen zu den weltweit besten gehören.

// Our main focus

The research department is specialised in the development of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) technology. Its core areas of expertise are the construction, characterisation and simulation of fuel cells and components as well as the construction of prototypes and the development of production and test technologies.

The power output range of our PEMFC component and stack developments starts at a few watts and extends up to 100 kW_{el}. The output, service life, efficiency and compactness of fuel cells can be optimised. This also involves researching and estimating ageing processes and error analyses. We also focus on developing manufacturing technology and characterising PEMFC components, cells and stacks including fuel cells suitable for vehicles. Modelling and simulating processes in fuel cells enables us to rapidly optimise component structures and operating conditions. This also includes the development and establishment of completely new approaches using advanced simulation software.

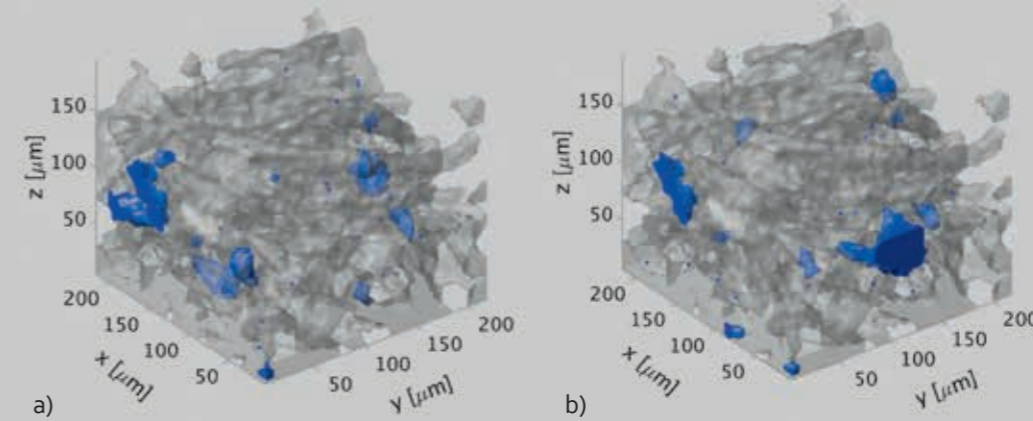
The simulation results are verified using meaningful hardware and conducting experiments under realistic conditions. For example, the water management within the gas diffusion electrodes and gas distribution layers is validated using a μ -CT system. This system also enables GDL structures, including their water content, to be investigated under compression. In order to visualise components, cells and stacks, the team also uses processes involving neutron and synchrotron radiography and tomography that are jointly developed and conducted with the Helmholtz Centre Berlin (HZB). These technologies enable temporal and spatial resolutions that are among the best in the world.



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

// Dr. Joachim Scholta, Head of Department
E-mail: joachim.scholta@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-206

“Our work focusses on optimising fuel cells with all their components in terms of design, manufacturing, output and service life.”



// Wasserverteilung im GDL-Substrat mittels kinetischer Monte-Carlo-Simulation (KMC) bei einer Stromdichte von a) 0,3 A/cm², b) 0,9 A/cm².
// Water distribution within the GDL substrate using kinetic Monte Carlo simulation (KMC) at a current density of a) 0.3 A/cm², b) 0.9 A/cm².

// Modellierung der Wasserverteilung in Elektroden

Das Fachgebiet besitzt langjährige Erfahrungen im Bereich der Modellierung von Wasserverteilungen in Gasdiffusionslagen (GDL) und Katalysatoren mittels Monte-Carlo-Simulation (MC). Die bisher verwendeten Techniken erlauben die Berücksichtigung von Struktur- und Oberflächeneffekten sowie – auf der Basis von aus CFD-Berechnungen erhaltenen Randbedingungen – von Verdunstungs- und Kondensationseffekten innerhalb der GDL. Die nach diesem Verfahren erzielten Ergebnisse wurden mithilfe von röntgenstrahlbasierten Methoden validiert. Die Beispiele in der untenstehenden Abbildung zeigen eine weitgehende Übereinstimmung zwischen der simulierten und der experimentell ermittelten Wassersättigung in Durchtrittsrichtung.

In einem weiteren Schritt wird derzeit eine Modellerweiterung vorgenommen, welche es erlaubt, zeitaufgelöste MC-Simulationen durchzuführen. Diese Technik wird als kinetische Monte-Carlo-Methode (KMC) bezeichnet. Damit ist es möglich, die Simulationen direkt mit BZ-Stromdichten und dem damit in Verbindung stehenden Wassereintrag zu verknüpfen. Die bisher erzielten Ergebnisse erlauben eine Berücksichtigung von Struktur- und Oberflächeneffekten in Verbindung mit dem realen stromdichteabhängigen Flüssigwassereintrag in die GDL.

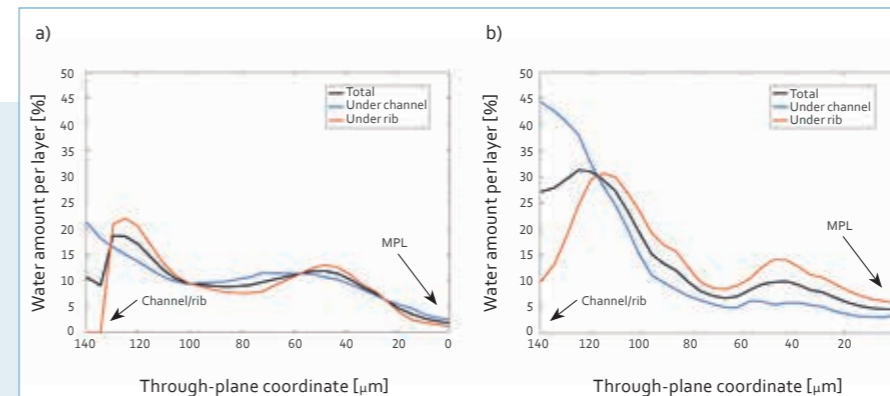
Die Abbildung oben zeigt die zu erwartende Wasserverteilung innerhalb einer GDL für zwei verschiedene Stromdichten. Die vorgestellten Simulationstechniken erlauben das vertiefte Verständnis des Wasserhaushalts in Brennstoffzellen und sind ein wertvolles Entwicklungswerkzeug zur Konzeption und Herstellung verbesserter Brennstoffzellenkomponenten.

// Modelling the water distribution in electrodes

The department has many years of experience in modelling water distribution in gas diffusion layers (GDLs) and catalysts using Monte Carlo (MC) simulations. The techniques used so far enable structure, surface and – based on boundary conditions obtained from CFD calculations – evaporation and condensation effects to be considered within the GDL. The results obtained by this method were validated using X-ray based methods. The examples in the figure below show a close match between the simulated and the experimentally determined water saturation in through-plane direction.

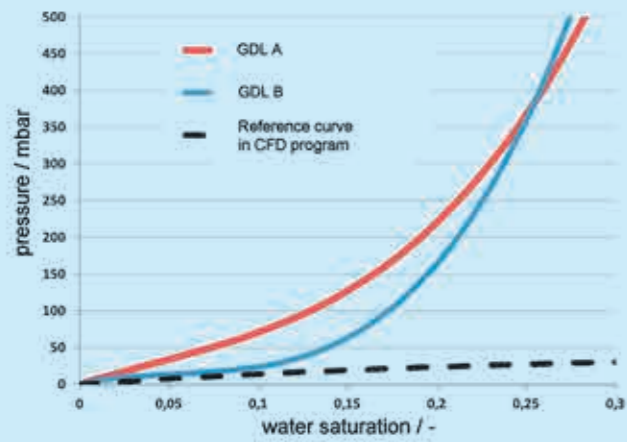
In a further step, a model is currently being extended to enable time-resolved MC simulations. This technique is known as the kinetic Monte Carlo method (KMC) and enables the simulations to be directly linked with fuel cell current densities and the associated water input. The results achieved so far enable structural and surface effects to be considered in conjunction with the actual current density-dependent liquid water input into the GDL.

The figure above shows the expected water distribution within a GDL for two different current densities. The introduced simulation techniques allow a deeper understanding of the water balance in fuel cells and provide a valuable development tool for conceiving and producing improved fuel cell components.

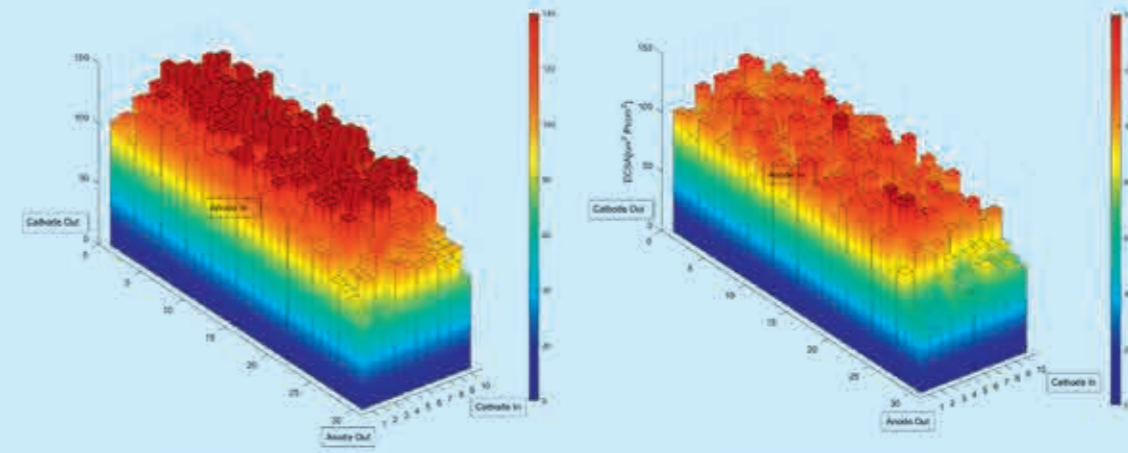


// Wasserverteilung im GDL-Substrat a) mittels Monte-Carlo-Simulation (MC) b) experimentelle Ergebnisse mittels Röntgen-Tomographie.
// Water distribution within the GDL substrate a) by Monte Carlo simulation (MC) b) experimental results employing X-ray tomography.

// Dr. Florian Wilhelm
E-mail: florian.wilhelm@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-203



// Experimentelle Kapillardruck-Sättigungskurven für zwei GDLs aus dem OptiGAA-II-Projekt im Vergleich zum im CFD-Paket verwendeten Standardmodell.
 // Experimentally determined capillary pressure saturation curves for two GDLs from the OptiGAA II project compared to the standard model used in the CFD package.



// Messergebnisse: ECSA-Verteilung zu Lebensbeginn (BOL, links) und nach 2.800 Betriebsstunden (rechts) für Zelle 1.
 // Experimental results: ECSA distribution at beginning of life (BOL, left) and after 2,800 operation hours (right) for cell 1.

// Elektrodenstrukturen optimieren

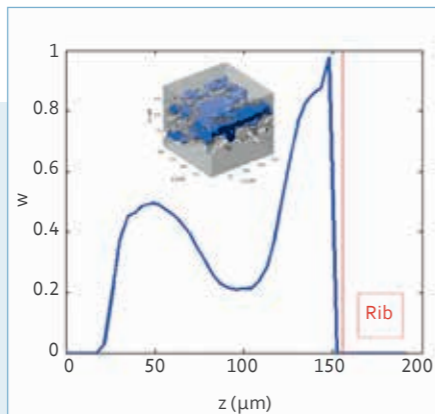
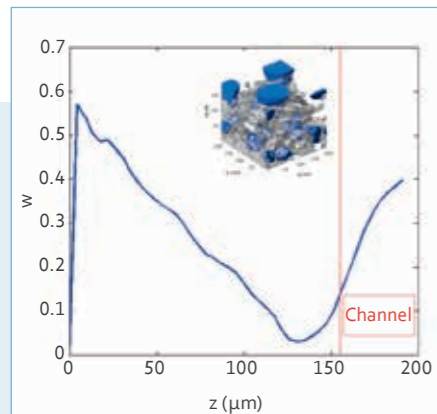
Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekts „OptiGAA II“ wurde eine verbesserte Gasdiffusionsschicht (GDL) von Brennstoffzellen-Elektroden für automotive Anwendungen entwickelt. Der Beitrag des ZSW hierzu bestand zum einen in umfangreichen Untersuchungen von GDL-Materialien mittels Methoden der Mikrostrukturanalyse sowie in ausführlichen Studien zur Bestimmung des Wasserhaushalts mittels Visualisierungsverfahren. Hierbei kamen röntgenstrahlbasierte Methoden sowie eine im Rahmen des Projekts optimierte Ex-situ-Testapparatur zur Bestimmung der Druckabhängigkeit der Wassersättigung der GDL („Leverett-Funktion“) zum Einsatz. Bei dieser Bestimmung zeigten sich erhebliche Abweichungen zu den im verwendeten CFD-Paket eingesetzten Standardansätzen (s. Abb. oben). Die Untersuchungen zur Wassersättigung wurden zur Verbesserung der CFD-Modellierungsarbeiten verwendet. Am ZSW wurden hierzu Monte-Carlo-Simulationen für im Rahmen des Projekts hergestellte Gasdiffusionslagen zur Bestimmung der erwarteten Wasserverteilung durchgeführt. Exemplarisch sind in der Abbildung unten die resultierenden Wassersättigungen für einen Bereich unter dem Kanal bzw. unter dem Steg wiedergegeben.

Die Ergebnisse zeigen einen erheblichen Einfluss der Kanal/Steg-Struktur auf die Wasserverteilung und erlauben ein vertieftes Verständnis des Einflusses unterschiedlicher GDL-Substratstrukturen auf die Wassersättigung und -verteilung. Die erzielten Ergebnisse wurden im Rahmen des Gesamtprojekts für die Konzeptionierung der optimierten Gasdiffusionslagen verwendet.

// Optimising electrode structures

As part of the OptiGAA II project funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, an improved gas diffusion layer (GDL) for fuel cell electrodes has been developed for automotive applications. ZSW's contribution to this project included conducting both extensive investigations of GDL materials by means of microstructural analysis methods as well as detailed studies for determining the water balance by means of visualisation methods. X-ray-based methods were used in conjunction with an ex-situ test apparatus, which was optimised in the project for determining the pressure-dependence of the GDL's water saturation ("Leverett function"). This work revealed significant deviations from the standard approaches deployed in the CFD package used (see fig. above). The investigations about water saturation improved the CFD modelling. For this purpose, ZSW conducted Monte Carlo simulations for the gas diffusion layers produced during the project in order to determine the expected water distribution. By way of example, the figure below shows the resulting water saturations for an area below the channel and rib.

The results reveal the considerable influence of the channel/rib structure on the water distribution and allow a greater understanding of the influence of different GDL substrate structures on the water saturation and distribution. The results obtained were used in the overall project for conceiving the optimised gas diffusion layers.



// Monte-Carlo-Simulation, Mittelwerte und lokale Verteilung der Wassersättigung von einer im Projekt verwendeten GDL a) unter dem Kanal, b) unter dem Steg.
 // Monte Carlo simulation, average and local distribution of the water saturation from a GDL used within the project a) under the channel, b) under the rib.

// Dr. Joachim Scholta
 E-mail: joachim.scholta@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-206

// Alterung von Brennstoffzellen für Fahrzeuge

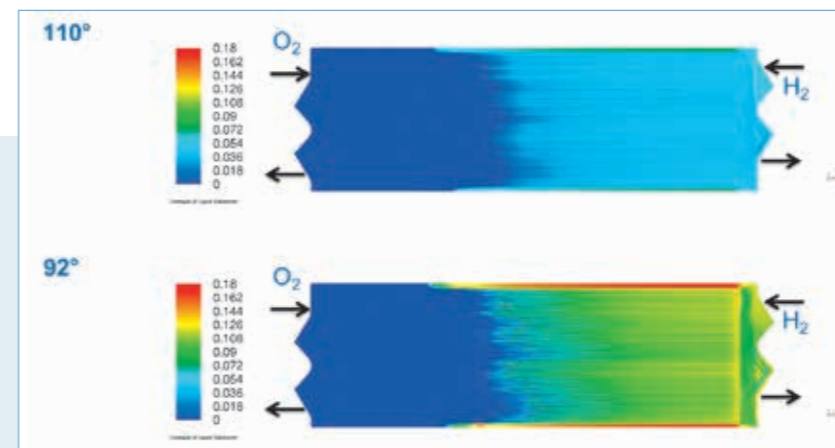
Im Projekt „SoHMuSDaSS“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie werden Alterungseffekte an verschiedenen Brennstoffzellendesigns untersucht. Am ZSW werden hierzu Experimente an automobilnahen Fünfzell-Stacks (Aktivfläche 300 cm²) durchgeführt. Für das Tageslastprofil werden die Stacks mit einem fahrzeugtypischen zwanzigminütigen Lastprofil einschließlich unterschiedlich langer Standzeiten belastet. Dieses Tageslastprofil dient zur Simulation eines Taxibetriebs. Unter dieser Belastung kam es nach ca. 2.000 Betriebsstunden zu standzeitunkritischen Alterungseffekten.

Ein Schwerpunkt im Projekt ist die Entwicklung geeigneter Diagnosemethoden. Bei den Fünfzell-Tests wird eine Stromdichtemessplatte mit 300 Segmenten verwendet, welche eine kontinuierliche In-situ-Messung der Stromdichteverteilung ermöglicht. Nach bestimmten Alterungszeiten wurden ortsaufgelöste Charakterisierungstests der elektrochemisch aktiven Oberfläche (ECSA), des H₂-Crossovers sowie der Impedanz durchgeführt. Begleitend erfolgten CFD-Simulationen zur Zellalterung, die auf experimentell bestimmten Parametern basieren. Aus den Stackversuchen erhält man z. B. die Änderung der ECSA. Ergänzend werden mit Ex-situ-Alterungsversuchen an GDLs die Änderungen der inneren Kontaktwinkel bestimmt. Die Simulationen und die Experimente zeigen dabei vergleichbare Tendenzen. Die im Rahmen des Projekts weiterentwickelten ortsaufgelösten Messungen erlauben die lokale Zuordnung der Alterungseffekte und sind für die Beurteilung des zeitlichen Verlaufs der Alterung und für künftige Optimierungen sehr hilfreich. Mit den CFD-Rechnungen konnte der alterungsbedingte Einfluss des inneren Kontaktwinkels des GDL-Substrates und der ECSA gezeit werden.

// Ageing of fuel cells for vehicles

The SoHMuSDaSS project, funded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, is investigating the ageing effects of different fuel cell designs. At ZSW, experiments are being carried out on automotive-related five-cell stacks (active area: 300 cm²). For the daily load profile, the stacks are loaded with a vehicle-typical twenty-minute load profile, including idle times of different lengths. This daily load profile is used to simulate the operation of a taxi. Under this load, there are significant, but non-critical ageing effects after about 2,000 operating hours.

One focus of the project is on developing suitable diagnostic methods. Five-cell tests use a 300-segment current density measuring board that provides continuous in-situ measurements of the current density distribution. After specific ageing times, spatially resolved characterisation tests are carried out in each case for the electrochemically active surface area (ECSA), H₂ crossover and impedance. CFD simulations of cell ageing were performed in parallel, based on experimentally determined parameters. The stack trials reveal, for example, the change in the ECSA. In addition, the changes in the inner contact angles are determined using ex-situ ageing tests on GDLs. The simulations and the experiments show comparable tendencies. The spatially resolved measurements developed within the scope of the project enable the local assignment of ageing effects and are very helpful in assessing the temporal course of the ageing and for further optimisation tasks. CFD calculations showed the age-related influence of the inner contact angle of the GDL substrate and the ECSA.

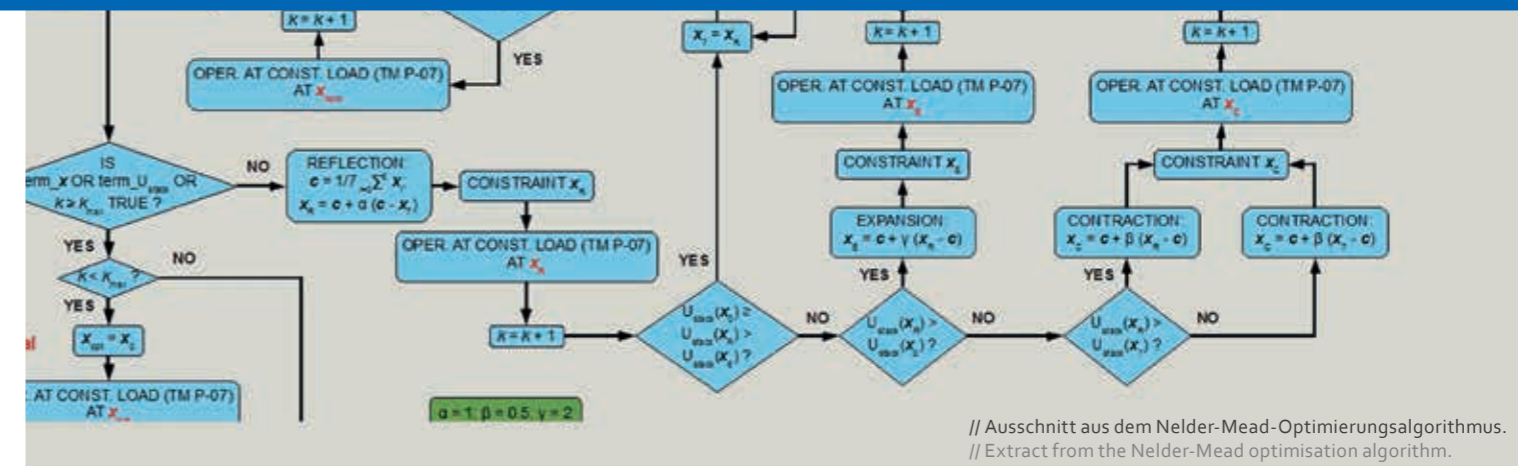


// CFD-Ergebnisse: Flüssigwassersättigung in der Mitte des Kathoden-GDL-Substrats bei Variation des inneren Kontaktwinkels bei einer Stromdichte von 0,9 A cm⁻².
 // CFD results: liquid water saturation in the middle of the cathode GDL substrate for different inner contact angles at a current density of 0.9 A cm⁻².

// Matthias Messerschmidt
 E-mail: matthias.messerschmidt@zsw-bw.de
 Phone: +49 731 9530-205

// Brennstoffzellen Systeme (ECS)

Fuel Cell Systems (ECS)



// Unsere Kernkompetenzen

Das Fachgebiet ECS betreibt ein Testzentrum mit 25 vollautomatisierten Testständen von 0,1 bis 120 kW zur professionellen Rund-um-die-Uhr-Charakterisierung von Brennstoffzellenstacks, -systemen und -systemkomponenten. Eine umfangreiche Analytik ermöglicht die detaillierte Bewertung von Alterungsvorgängen und ausführliche Fehleranalysen. Seit Sommer 2012 können Brennstoffzellen bis 100 kW_{el} auch nach der DIN EN 62282-2 geprüft werden.

Industriepartner nutzen die Tests und das langjährige Know-how der Experten, um ihre Produkte weiterzuentwickeln sowie deren Sicherheit nachzuweisen. In öffentlich geförderten Projekten werden wertvolle Daten und Erfahrungen generiert, die der Allgemeinheit zur Verfügung stehen. Langjährige Erfahrung bildet die Basis zur Entwicklung von Systemen für die unterschiedlichsten Anwendungen: von wenigen Watt bis 100 kW, 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.

Das Fachgebiet unterstützt Industriepartner bei der Entwicklung und Erprobung von Brennstoffzellensystemen und Systemkomponenten, bei Sicherheitsbewertungen, bei Packaging-Studien und bei der Produktzertifizierung. Flüssige Brennstoffe wie Methanol sind aufgrund ihres hohen Energieinhaltes, der umweltschonenden Herstellung über Power-to-Liquid (P2L) und ihrer einfachen Speicherung interessant. Dazu werden hochkompakte Komponenten für die Reformierung dieser Brennstoffe sowie für die Aufbereitung der Edukte entwickelt und komplette Reformer-systeme gebaut.

// Our main focus

In order to characterise fuel cell stacks, systems and system components professionally in 24/7 operation, the ECS department runs a test centre with 25 fully automated test benches from 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_{el} were tested in accordance with DIN EN 62282-2.

Industry partners employ the tests and the long-standing know-how of our experts to develop products and demonstrate their safety. Valuable data and experience are gathered in publicly funded projects, which are also available to the public. 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 to automotive systems. Our scope of services comprises complete prototypes, including monitoring these and hybridisation with batteries and DC/AC converters.

The department supports industry partners by developing and testing fuel cell systems and system components and carrying out safety assessments as well as packaging studies and product certifications. There is considerable interest in liquid fuels like methanol because of their high energy content, the environmentally friendly way in which they are manufactured via Power-to-Liquid (P2L) and easy storage. We are developing highly compact components for reforming fuels, preparing the reactants, and constructing complete reforming systems.

// Hybridisierung von Brennstoffzellenantrieben

Brennstoffzellensysteme stehen weltweit auf der politischen Agenda, um die Markteinführung einer emissionsfreien, wasserstoffbasierten Energieversorgung voranzutreiben. Mit dem deutsch-polnischen Kooperationsprojekt COALA „Control ALgorithm and controller for increasing the efficiency of hybrid PEMFC systems in different Applications“ sollen Hybridisierungsstrategien für Brennstoffzellenantriebe entwickelt werden, um die Lastverteilung zwischen Brennstoffzelle und Batterie zu verbessern. Dazu sollen Überwachungs- und Kontrollmethoden entwickelt werden. Die Partner des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts sind DLR (Koordinator), die Universität Danzig, zwei Industriepartner und das ZSW.

Der Fokus des ZSW liegt auf effizienten Betriebs- und Regelstrategien für den Systembetrieb und auf den Einflüssen der Betriebsparameter auf die Lebensdauer des Brennstoffzellensystems. Zur Ermittlung von effizienten System-Betriebsparametern konnte in der Steuerung der Teststände ein vollautomatisierter Such-Algorithmus implementiert werden, der im Rahmen des EU-Projekts Stacktest am ZSW entwickelt wurde. Die Regelparameter Druck, Stöchiometrie, Feuchte und Temperatur werden dabei simultan optimiert und die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellenstacks evaluiert (s. Abb. unten). Für die Berechnung der Systemeffizienz werden zusätzlich typische Systemkomponenten wie der Luftkompressor berücksichtigt. Der Algorithmus liefert die Testparameter in einer Art Rankingliste, auf deren Basis Dauertests erfolgen, um die Zellalterung mit Referenz-Dauertests zu vergleichen. Eine Zusatzsensorik liefert systemtaugliche Indikatoren, die ein frühzeitiges Einschreiten bei einer sich anbahnenden Verschlechterung des Brennstoffzellenstacks ermöglichen.

// Hybridisation of fuel cell drives

Fuel cell systems are on the worldwide political agenda in order to progress the market launch of zero-emission, hydrogen-based energy supplies. Hybridisation strategies for fuel cell drives are being developed in the German-Polish COALA cooperation project, which stands for “Control ALgorithm and controller for increasing the efficiency of hybrid PEMFC systems in different Applications”, in order to improve the load distribution between the fuel cell and battery. For this purpose, the intention is to develop monitoring and control methods. The partners in the project, which is funded by the German Federal Ministry of Education and Research, are the DLR (coordinator), the University of Gdańsk, two industrial partners and ZSW.

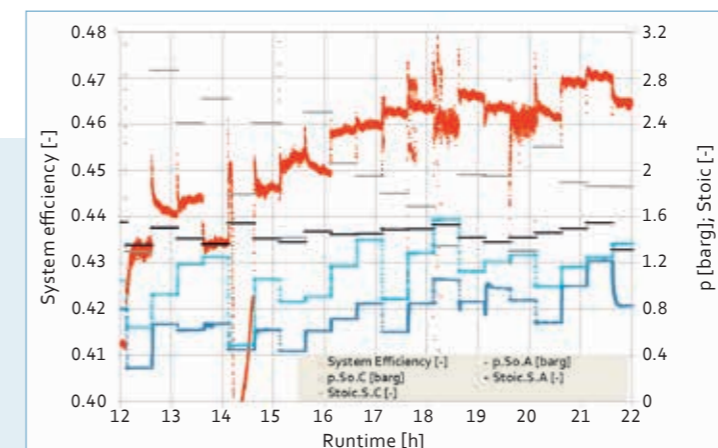
ZSW is focussing on developing efficient operating and control strategies for the system operation and on determining how operating parameters influence the lifetime of the fuel cell system. In order to determine efficient system operating parameters, a fully automated search algorithm has been successfully implemented in the control system for the test rigs, which was developed at ZSW as part of the EU Stacktest project. This simultaneously optimises the pressure, stoichiometry, humidity and temperature control parameters and evaluates their effects on the performance of the fuel cell stack (see fig. below). In addition, typical system components such as the air compressor are also taken into account for calculating the system efficiency. The algorithm provides the test parameters in a kind of ranking list, which is used as the basis for conducting endurance tests to compare the cell ageing with reference endurance tests. Additional sensor technology provides indicators suitable for the system that enable early intervention if there is impending deterioration of the fuel cell stack.



„Langfristig sind die weltweiten Klimaziele ohne Wasserstofftechnologien nicht zu erreichen. Nun müssen wir lernen, den Wasserstoff in unseren Alltag zu integrieren.“

// Dr. Alexander Kabza, Head of Department
E-mail: alexander.kabza@zsw-bw.de, phone: +49 731 9530-832

“In the long run, global climate goals will not be achievable without hydrogen technology. Now we have to learn how to integrate hydrogen into our daily life.”



// Ergebnis eines typischen Effizienzoptimierungs-Suchlaufs, dargestellt sind Effizienz, Gasdrücke und Stöchiometrien über die Zeit.
// Result of a typical efficiency optimisation search in which efficiency, gas pressures and stoichiometries are depicted over time.

More information at: <http://coala.zsw-bw.de>

// Jürgen Hunger
E-mail: juergen.hunger@zsw-bw.de
Phone: +49 731 9530-821



// Öffentlichkeitsarbeit

// Public Relations



Unsere Themen sind vielseitig. 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 2017.

We cover a broad range of topics. This is why we deliver comprehensible, neutral information to the economic, political and social arenas. Our goal is to facilitate understanding and evaluation of new technologies and thus to win support for their implementation and help shape the energy supply of the future. The following review provides you with an insight into our events and public relations work in 2017.

// ZSW weiht neues Institutsgebäude in Stuttgart ein
Das ZSW hat sein neues Institutsgebäude am Standort Stuttgart bezogen. Am 5. Juli fand die offizielle Einweihung mit Wirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut und dem Oberbürgermeister der Landeshauptstadt Stuttgart Fritz Kuhn statt. Die Wissenschaftler verfügen nun über mehr Platz und eine verbesserte Infrastruktur zur Entwicklung von Technologien für die Energiewende. Der Energiebedarf des Gebäudes wird zu einem großen Teil aus klimaschonenden Quellen gedeckt: Durch 32 Erdwärmesonden und 357 Solarmodule in der vom ZSW entwickelten CIGS-Dünnschichttechnologie. Zum Neubau siehe auch den Bericht auf Seite 14.

// ZSW inaugurates the new institute building in Stuttgart
ZSW has moved into its new institute building in Stuttgart. On the 5th of July, the building was officially inaugurated in the presence of Baden-Württemberg's State Minister for Economic Affairs, Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut, and the Mayor of Stuttgart, Fritz Kuhn. The scientists now have more space and an improved infrastructure for developing technologies for the energy transition. The building's energy needs are largely met by climate-friendly sources, including 32 borehole heat exchangers and 357 solar modules utilising the CIGS thin-film technology developed by ZSW. You can find out more about the new building in the report on page 14.



// Das neue Institutsgebäude des ZSW in Stuttgart.
// ZSW's new institute building in Stuttgart.



// Landeswirtschaftsministerin Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut (li.) mit den ZSW-Vorständen Prof. Frithjof Staiß und Prof. Michael Powalla bei der Einweihung des neuen Institutsgebäudes in Stuttgart.
// Baden-Württemberg's State Minister for Economic Affairs, Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut (left), with ZSW board members Prof. Frithjof Staiß and Prof. Michael Powalla at the official opening of the new institute building in Stuttgart.



// Der „grüne“ Besuch vor der Dünnschicht-Solarfassade des ZSW (v.l. n. r.: M. Schmidt, ZSW, M. Stickel, Solar Cluster, Robert Habeck und Cem Özdemir, Dr. C. Tschamber, Solar Cluster, sowie die ZSW-Vorstände Prof. M. Powalla und Prof. F. Staiß).
// The "green" visit in front of the thin-film solar façade at ZSW (f. l. t. r.: M. Schmidt, ZSW, M. Stickel, Solar Cluster, Robert Habeck and Cem Özdemir, Dr. C. Tschamber, Solar Cluster and ZSW board members Prof. M. Powalla and Prof. F. Staiß).

// Cem Özdemir und Robert Habeck zu Besuch bei Solar Cluster und ZSW

Cem Özdemir, MdB, Spitzenkandidat von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und Robert Habeck, Umweltminister und stellv. Ministerpräsident von Schleswig-Holstein, besuchten am 31. August das Solar Cluster Baden-Württemberg e. V. und das ZSW. Der Besuch diente dem Informationsaustausch mit dem Solar Cluster und dem ZSW in Stuttgart-Vaihingen. Beim Rundgang durch die Labore des ZSW und der Besichtigung der Fassade aus CIGS-Dünnschichtsolarmodulen konnten sich die hochrangigen Gäste ein Bild von der Zukunft der Energiebranche machen. Während des Besuchs verständigten sich die Anwesenden darauf, dass die Politik mehr Anreize für Investitionen in erneuerbare Energien schaffen müsse – etwa mit der Einführung einer CO₂-Abgabe.

// Cem Özdemir and Robert Habeck visit the Solar Cluster and ZSW

On 31 August, Cem Özdemir, Member of the German Bundestag and lead candidate for the Green Party, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, and Robert Habeck, State Minister of the Environment and Deputy Prime Minister of Schleswig Holstein, visited the Solar Cluster Baden-Württemberg e.V. and ZSW. The visit was used to discuss the Solar Cluster and ZSW in Stuttgart-Vaihingen. During a tour of the ZSW laboratories and a visit to the façade with integrated CIGS thin-film solar modules, the high-ranking guests were able to gain an impression of the future energy industry. During the visit, those present agreed that policymakers need to create more incentives to invest in renewable energy, such as the introduction of a carbon tax.

// EVS 30 macht Station im ZSW

Der 30. Weltkongress der Elektromobilität „Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS 30)“ bot vom 9. bis 11. Oktober in Stuttgart Gelegenheit, sich über den Stand der Elektromobilität sowie zu verkehrs- und stadtplanerischen Konzepten und zivilgesellschaftlichen Engagements zu informieren. Im Anschluss konnte die internationale Fachwelt in „Technical Tours“ Akteure in der Region kennenlernen. Da im Auto oder für den stationären Speicher die Batterien über den Erfolg entscheiden, war das Interesse entsprechend groß, als die ZSW-Experten Prof. Dr. Werner Tillmetz (Ulmer ZSW-Vorstand) und Dr. Harry Döring (Leiter des Batterietestzentrums) über das einzigartige Forschungsspektrum am ZSW in Ulm berichteten. Insbesondere beeindruckten die umfangreiche Ausstattung im eLaB zur industriellen Produktionsforschung sowie die Möglichkeiten im Batterietestzentrum für alle Arten von Funktions- und Sicherheitstests.

// EVS 30 visits ZSW

The 30th Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS 30), which was held in Stuttgart from 9 to 11 October, provided an opportunity to find out more about the state of e-mobility as well as about transport and urban design concepts and social engagement. Afterwards, the international experts were able to join "technical tours" in order to get to know players in the region. Since the batteries in cars and stationary storage systems are decisive for success, the interest was correspondingly large when ZSW experts Prof. Dr. Werner Tillmetz (Ulm ZSW board) and Dr. Harry Döring (Head of the Battery Test Centre) reported on the unique range of research offered at ZSW in Ulm. Visitors were particularly impressed by the extensive equipment in the eLaB, which offers everything from process and production research up to the industrial scale and by the possibilities provided in the battery test centre, where all kinds of functional and safety tests are performed.



// Weltkongress EVS30 macht Station im ZSW in Ulm.
// EVS30 Electric Vehicle Symposium & Exhibition visits ZSW in Ulm.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Mexikanische Wissenschaftler zu Besuch in Ulm.
// Mexican scientists visit Ulm.

// Mexikanische Delegation besucht Baden-Württemberg
Das ZSW in Ulm war am 28. Juni Teil des Delegationsprogramms einer Gruppe mexikanischer Experten, die auf Einladung von Baden-Württembergs Ministerin Theresia Bauer den Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg kennenlernen wollten. Die Teilnehmer interessierten sich für den Technologietransfer in Verbindung mit der Energieforschung und erneuerbaren Energien. Vor diesem Hintergrund präsentierte das ZSW seine Forschung zum Thema Wasserstoff, Brennstoffzellen sowie stationären Energiespeichern in wissenschaftlichen Vorträgen und durch das Erleben von Wasserstoff-Mobilität.

// Lange Nacht der Wissenschaft an der Universität Ulm
Großer Andrang herrschte am 21. Juli auf dem Uni-Campus bei der 1. Langen Nacht der Wissenschaft in Ulm, die anlässlich des 50-jährigen Jubiläums der Universität Ulm stattfand. Ein großes Mitmachprogramm für Familien rund um die Themen Medizin, Technik, Psychologie, Wirtschafts- und Naturwissenschaften mit über 100 Programmpunkten lockte 7.000 Besucher – viele davon ans ZSW und WBZU. Hier konnten die Energie und Mobilität der Zukunft erlebt werden. Bis spät in den Abend fuhren die Besucher mit Elektrofahrzeugen, besuchten die WBZU-Labore und hörten Expertenvorträge. ZSW-Vorstand Prof. Dr. Werner Tillmetz referierte über „Emissionsfrei fahren mit Batterien und Brennstoffzellen“. Das ZSW ist Teil der Wissenschaftsstadt Ulm, ein Zentrum für Forschung, Entwicklung und Anwendung von Energietechnologien und Mobilitätskonzepten.

// Mexican delegation visits Baden-Württemberg
On 28 June, ZSW in Ulm formed part of the itinerary of a delegation of Mexican experts who, at the invitation of Baden-Württemberg's State Minister for Science, Theresia Bauer, were eager to find out more about Baden-Württemberg as a science and business location. The delegates were interested in technology transfer in connection with energy research and renewable energies. In view of this, ZSW presented its research on hydrogen, fuel cells and stationary energy storage systems in scientific lectures and also by enabling the delegates to experience hydrogen mobility at first hand.

// Long Night of Science at the University of Ulm
On 21 July, crowds thronged to the university campus to attend the 1st Long Night of Science in Ulm, which marked the 50th anniversary of the University of Ulm. An extensive hands-on programme for families on the topics of medicine, technology, psychology, economics and science, with more than 100 programme items, attracted 7,000 visitors. Many of them visited ZSW and WBZU so that they could experience the energy and mobility of the future for themselves. Until late in the evening, visitors drove electric vehicles, visited the WBZU laboratories and listened to expert presentations. ZSW board member Prof. Dr. Werner Tillmetz held a talk on Emission-free driving with batteries and fuel cells. ZSW forms part of the Ulm City of Science, a centre for the research, development and application of energy technologies and mobility concepts.



// Großen Zuspruch fand die Wasserstoffmobilität mit dem ZSW-Experten Markus Jenne (Bildmitte) bei der Langen Nacht der Wissenschaft.
// The hydrogen mobility topic with ZSW expert Markus Jenne (centre) proved to be very popular at the Long Night of Science.



// Einblicke in modernste Produktionstechnik beim Rundgang durchs eLaB. Die ZSW-Wissenschaftler Anton Fechtner (l.) und Dr. Alexander Tost (r.) leiteten die Lehrerfortbildung.
// Insights into state-of-the-art production technology during a tour of eLaB. ZSW scientists Anton Fechtner (left) and Dr. Alexander Tost (right) led the teacher training.

// Forschung trifft Schule – Lehrerfortbildung im eLaB
Im Rahmen der vor 25 Jahren von den Chemie-Verbänden Baden-Württemberg ins Leben gerufenen Veranstaltung „Dialog Schule – Chemie (DSC)“ öffnete am 10. Mai das ZSW Labor für Batterie-technologie (eLaB) in Ulm seine Labore für rund 30 Chemielehrer. Im Fokus der Lehrerfortbildung stand die Forschung zur Chemie rund um die Elektromobilität und neue Akkumulatorentechnologien. Bei einem Vortrag mit Laborführung wurden die Batterie-forschung sowie Fakten rund um das Thema Elektromobilität präsentiert. Die spannenden Einblicke in modernste Produktionstechnologien zur Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen stießen auf großes Interesse.

// 8th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech 8)
Der zweite gemeinsam vom ZSW und dem Helmholtz-Zentrum Berlin veranstaltete internationale CIGS-Workshop erwies sich als voller Erfolg. Rund 130 Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus 15 Ländern trafen sich am 30. Mai in Stuttgart, um neue Ergebnisse aus der Forschung und Industrie zu CIGS-Dünnschichtsolarzellen zu diskutieren. Vorträge, Diskussionen, Poster-Sessions und eine Besichtigung der neuen ZSW-Labore in der Meitnerstraße gaben den CIGS-Experten aus aller Welt reichlich Gelegenheit zum Erfahrungsaustausch. Besonders gefreut hat uns, dass zahlreiche wichtige CIGS-Hersteller vertreten waren. Die Rückmeldungen der Teilnehmer zeigten denn auch, dass die Möglichkeit zum Austausch untereinander, die in dieser intensiven Form nur auf wenigen Veranstaltungen möglich ist, sehr positiv bewertet wurde.

// Research meets school – teacher training in eLaB
As part of the “Dialogue School – Chemistry” (DSC) event, which was jointly initiated by Baden-Württemberg's chemical industry associations 25 years ago, ZSW's Laboratory for Battery Technology (eLaB) in Ulm opened its doors for around 30 chemistry teachers on 10 May. The teacher training focussed on chemistry-based research relating to e-mobility and new accumulator technologies. A lecture and subsequent guided tour of the laboratory were used to present battery research topics as well as facts about e-mobility. In addition to the expert lecture, the exciting insights into state-of-the-art production technologies for manufacturing lithium-ion cells met with considerable interest.

// 8th International Workshop on CIGS Solar Cell Technology (IW-CIGSTech 8)
The international CIGS workshop, which was jointly organised by ZSW and the Helmholtz Centre Berlin for the second time, proved to be a great success. Around 130 participants from 15 countries met in Stuttgart on 30 May to discuss the latest results from research and industry on CIGS thin-film solar cells. Presentations, discussions, poster sessions and a tour of the new ZSW laboratories in the Meitnerstrasse gave the CIGS experts from all over the world ample opportunity to exchange experiences. We were particularly pleased that many important CIGS manufacturers were represented. The feedback from the participants also showed that the opportunity to exchange information with each other, which few events make possible in this intensive form, was assessed very positively.



// Internationale Experten berichten über neue Fortschritte bei der CIGS-Technologie.
// International experts report on new advances in CIGS technology.



// Poster-Sessions boten die Möglichkeit, Forschungsergebnisse im Detail zu diskutieren.
// Poster sessions offered the opportunity to discuss research findings in detail.



// Öffentlichkeitsarbeit Public Relations

// Auf der Hannover Messe beteiligte sich das ZSW mit den Themen Batterien und Brennstoffzellen am Gemeinschaftsstand der eMobil BW.
// At the Hannover Industrial Trade Fair, ZSW presented its batteries and fuel cells at the joint booth with eMobil BW.



// „Fake News“ – zweites Themenboot der Ulmer ZSWler beim größten Ulmer Feiertag auf der Donau.
// “Fake News” – second themed boat by ZSW’s Ulm-based staffers at Ulm’s biggest holiday on the Danube.

// Ausstellungen und Messen 2017:

Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	8.–10.3.2017
Hannover Messe Industrie, Baden-Württemberg-Pavillon	24.–28.4.2017
ees und Intersolar Europe, München	31.5.–2.6.2017
Lange Nacht der Wissenschaft, Ulm	21.7.2017
European Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam	25.–29.9.2017
26. testXpo – Fachmesse für Prüftechnik Zwick GmbH & Co. KG, Ulm	16.–19.10.2017

// Exhibitions and trade fairs 2017:

Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein	8–10/3/2017
Hannover Industrial Trade Fair, Baden-Württemberg pavilion	24–28/4/2017
ees and Intersolar Europe, Munich	31/5–2/6/2017
Long Night of Science, Ulm	21/7/2017
European Solar Energy Conference and Exhibition (EU-PVSEC), Amsterdam	25–29/9/2017
26 th testXpo – Fachmesse für Prüftechnik Zwick GmbH & Co. KG, Ulm	16–19/10/2017

// ZSW wieder mit Tausenden auf und an der Donau in Ulm
Begonnen hat die Tradition bereits zu Reichsstadszeiten, für Ulmer ist es so etwas wie ein Nationalfeiertag: der Schwörmontag, der immer auf den vorletzten Montag im Juli fällt. Der Höhepunkt des Tages: das „Nabada“ (schwäbisch für Hinunterbaden) auf der Donau. Bei Sonnenschein zog es Ulmer Wissenschaftler zum zweiten Mal mit ihrem Themenboot „Fake News“ ins kühle Nass. Das „interdisziplinäre“ Projekt, von der Themenfindung bis zum Bootsbaubau, wurde in freiwilligen Einsätzen von den Mitarbeitern entworfen und umgesetzt.

// ZSW back with thousands on and along the Danube in Ulm
The tradition dating back to when Ulm was a “Free Imperial City” is considered by its population to be something of a “national holiday”: it is called Schwörmontag. The highlight of the day was the “Nabada” on the Danube (“Nabada” is a Swabian word for the custom of rowing boats and rafts down a river on that day). The scientists hit the water with their own boat for the second time, this time with the theme “Fake News”. The “interdisciplinary project”, which ranged from choosing the theme to building the boat, was conceived and implemented by the staff on a voluntary basis.

// Hannover Messe 2017 – ZSW im Baden-Württemberg-Pavillon
Zum 17. Mal zeigte das ZSW seine Kompetenz einem Fachpublikum aus aller Welt auf der Hannover Messe vom 24. bis 28. April unter dem Dach des Baden-Württemberg-Pavillons in der MobiliTec Area der Leitmesse ENERGY. Kernthemen des Gemeinschaftsstandes waren hybride und elektrische Antriebe, mobile und stationäre Energiespeicher, alternative Kraft- und Brennstoffe sowie ganzheitliche Mobilitätstechnologie-Lösungen. Das ZSW präsentierte die Themen Batterien und Brennstoffzellen.

// Industrial Trade Fair 2017 – Baden-Württemberg pavilion
For the 17th time, ZSW demonstrated its expertise at the Hannover Industrial Trade Fair, which was held from 24 to 28 April. ZSW appeared at Baden-Württemberg’s pavilion in the MobiliTec area belonging to the ENERGY trade show. Key topics at the joint stand included hybrid and electric drives, mobile and stationary energy storage systems, alternative power sources and fuels as well as holistic mobility technology solutions. ZSW highlighted its battery and fuel cells expertise.

// Viel Information, viel Innovation: ees 2017, München
Zum ersten Mal präsentierten sich die Speicherexperten des ZSW auf der „electrical energy storage (ees)“ in München mit einem eigenen Messestand. Die ees ist derzeit die größte und besucherstärkste Fachmesse für Batterien und Energiespeichersysteme. Im Fokus der diesjährigen Messe standen vor allem die Themen Großspeicher, Netzintegration und Elektromobilität. Neben der Messepräsenz bot ZSW-Vorstand Prof. Dr. Werner Tillmetz exklusive Einsichten im Rahmen der ees Conference, die mit 1.700 Teilnehmern aus 87 Ländern gut besucht war.

// Abundant information and innovation: ees 2017, Munich
For the first time, ZSW’s storage experts presented their work on their own stand at the “electrical energy storage (ees)” trade show in Munich. ees is currently the largest and most visited trade show for batteries and energy storage systems. This year, the main focus was on large-scale storage, grid integration and e-mobility. In addition to ZSW’s appearance at the trade exhibition, ZSW board member Prof. Dr. Werner Tillmetz also offered exclusive insights at the ees conference, which was well attended with 1,700 participants from 87 countries.

// Medienarbeit

Die Medienarbeit des ZSW ist aufgrund der attraktiven Themen des Instituts weiterhin erfolgreich. 2017 wurde insgesamt 1.822 Mal berichtet – das ist das zweitbeste Ergebnis seit Beginn der Zählung im Jahr 2007. Wie in den vergangenen Jahren war das Institut wieder in den wichtigsten regionalen und überregionalen Leitmedien wie Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Die Welt, Stuttgarter Zeitung, Handelsblatt, SWR usw. vertreten.

// Media relations

Thanks to the institute’s attractive topics, ZSW has continued its successful public relations work. In 2017, 1,822 articles referred to ZSW – the second-best result since counting started in 2007. As in previous years, the institute was once again mentioned in the most important regional and national mainstream media outlets such as the Süddeutsche Zeitung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Die Welt, Stuttgarter Zeitung, Handelsblatt and SWR.

Die beste Resonanz erzielten folgende Pressemitteilungen:

- > Dünnschichtphotovoltaik: ZSW-Technologie erobert den internationalen Markt
- > Bundesländervergleich Erneuerbare Energien: Baden-Württemberg neuer Spitzenreiter vor Mecklenburg-Vorpommern und Bayern
- > ZSW und BDEW zum Anteil der Erneuerbaren Energien am Stromverbrauch 2017
- > E-Mobilität mit Brennstoffzelle: Projekt „AutoStack-Industrie“ schafft Basis für Brennstoffzellen-Serienfertigung in Deutschland
- > Dünnschichtphotovoltaik an der Fassade den Weg in den Markt ebnet

The best feedback was generated by the following press releases:

- > Thin-film photovoltaics: ZSW technology conquers international market
- > Comparison of renewable energy development in German federal states: Baden-Württemberg new front-runner ahead of Mecklenburg-Western Pomerania and Bavaria
- > ZSW and BDEW on renewables’ share of power consumed in 2017
- > E-mobility with fuel cells: “AutoStack-Industrie” project creates basis for fuel cell series production in Germany
- > Paving the way for the introduction of façade-based thin-film photovoltaics on the market



// ZSW-Stand der Batterieforscher bei der ees 2017.
// ZSW booth of battery experts at ees 2017.



// ZSW-Stand der Photovoltaik-Experten bei der Intersolar 2017.
// ZSW booth with photovoltaic experts at Intersolar Europe 2017.



// Auf der EU-PVSEC in Amsterdam präsentierte das ZSW aktuelle Ergebnisse aus der PV-Materialforschung.
// At EU-PVSEC in Amsterdam, ZSW presented recent results of PV materials research.

The background is a dark blue field filled with a complex pattern of glowing particles and a grid of light blue lines. The grid is composed of small squares and is slightly offset from the center, creating a sense of depth and movement. The particles are scattered throughout, with some appearing as bright spots and others as faint trails, suggesting a dynamic, data-driven environment.

//Dokumentation

// Documentation

// Finanzielle Entwicklung Financial Development



// Einnahmen – Ausgaben

Das Einnahmenvolumen der gewöhnlichen Geschäftstätigkeit lag im abgelaufenen Jahr bei 44,9 Mio. Euro und damit auf dem Niveau des Vorjahres.

Die Anteilsfinanzierung des Landes Baden-Württemberg erhöhte sich im Jahr 2017 um 0,2 Mio. auf 4,6 Mio. Euro.

Einer Zunahme bei den Einnahmen aus der Auftragsforschung steht ein Rückgang bei den sonstigen Einnahmen gegenüber.

// Revenue – expenditure

The income volume for ordinary business activities amounted to 44.9 million euros in the past year, which was therefore at the same level as the previous year.

The proportion of institutional funding from the Federal State of Baden-Württemberg increased by 0.2 million to 4.6 million euros in 2017.

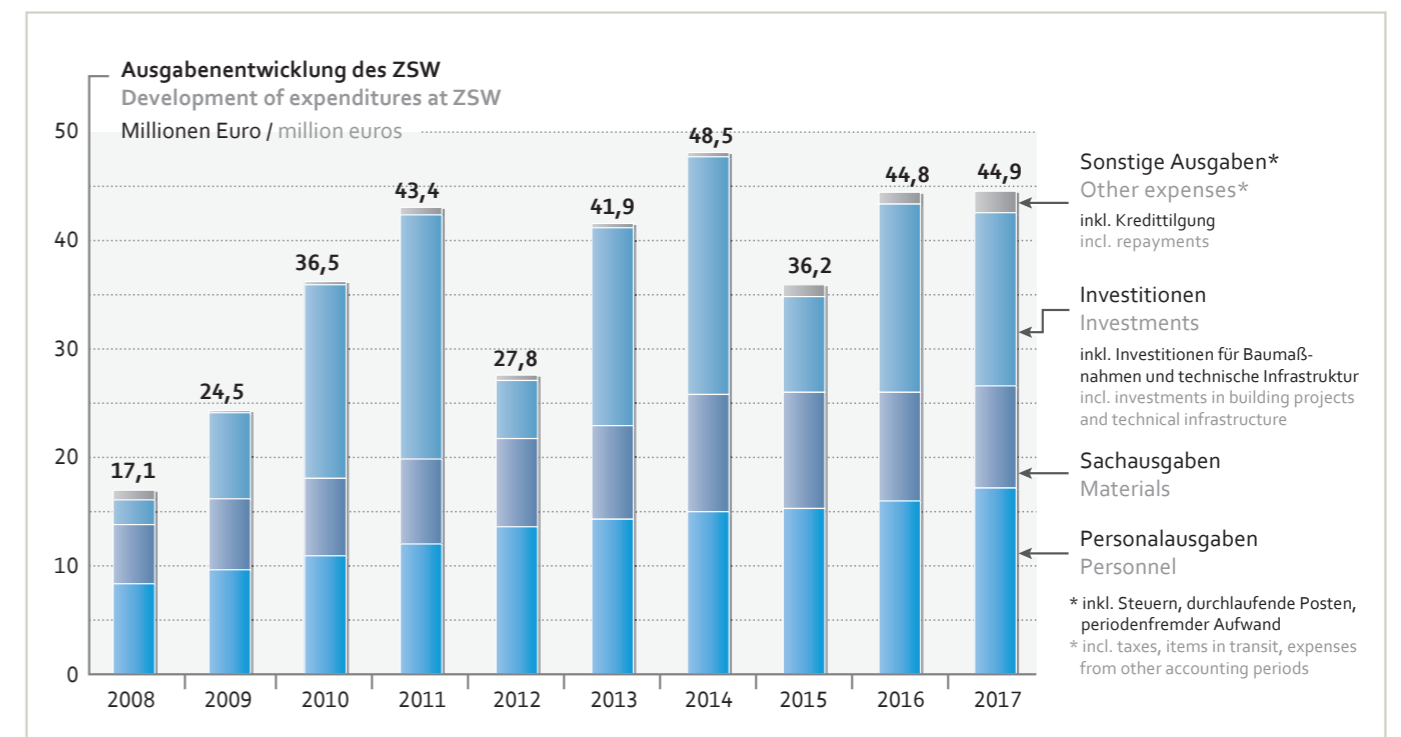
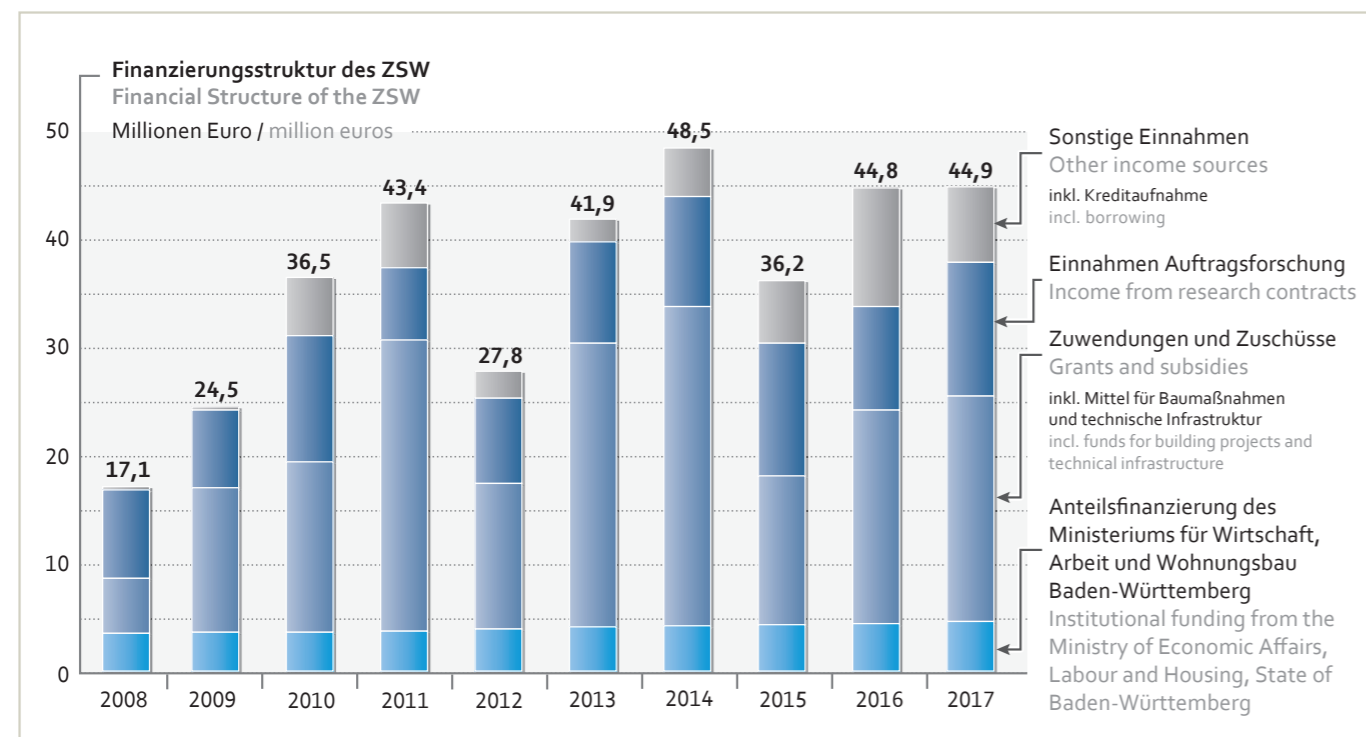
An increase in revenue from contract research is offset by a decline in other revenue.

Das korrespondierende Ausgabenvolumen entspricht mit 44,9 Mio. Euro in etwa dem Vorjahr. Darin enthalten sind Investitionsausgaben für einen Institutsneubau in Stuttgart, der größtenteils langfristig durch Darlehen finanziert ist.

Die Personalausgaben stiegen aufgrund einer Tariferhöhung und eines Anstiegs der Personalkapazität.

The corresponding expenditure volume of 44.9 million euros is also similar to the previous year. This includes capital expenditures for a new institute building in Stuttgart, most of which is financed on the long term through loans.

Due to a collective pay increase and a rise in personnel capacity, expenditure for human resources rose.



// Personalentwicklung Staff Development



// Personalentwicklung

Das ZSW ist mit seinen Zukunftsthemen, seinen Arbeitsbedingungen, dem kollegialen Betriebsklima sowie den vielfältigen Entwicklungsperspektiven für seine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter ein attraktiver Arbeitgeber.

Die Mitarbeiterkapazität hat sich gegenüber dem Vorjahr von 216 Vollzeitstellen auf 219 erhöht. Das entspricht einer Mitarbeiterzahl von 238. Mit einem Anteil von 82 % des wissenschaftlich-technischen Personals an der gesamten Personalkapazität ist die Produktivität auf einem stabilen hohen Niveau.

Das ZSW ist auch für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland attraktiv. So hatten gut 10% aller Beschäftigten eine ausländische Staatsbürgerschaft, wobei diese aus sieben verschiedenen Ländern kamen.

Der Frauenanteil lag bei 22%. Das ZSW bemüht sich, diesen für technisch orientierte Forschungsinstitute typischen Anteil zu erhöhen, indem es möglichst flexibel ausgestaltete Arbeitszeitmodelle anbietet, die die unterschiedlichen Lebenssituationen und Interessen von Frauen und Männern berücksichtigen und eine Vereinbarkeit von Beruf und Familie erleichtern.

Kompetente und motivierte Mitarbeiter sind unser Erfolgsfaktor. Das ZSW stellt deshalb ein breites Spektrum an Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen zur Verfügung. Es umfasst fachspezifische und fachübergreifende Inhalte ebenso wie Angebote zur Persönlichkeitsentwicklung und Schulungen für Führungskräfte. Das Interesse daran ist groß. Insgesamt fanden im Berichtsjahr über 30 Veranstaltungen statt, an denen insgesamt 140 Beschäftigte teilnahmen. Darüber hinaus standen im Rahmen des betrieblichen Gesundheitsmanagements am ZSW Angebote zu den Themen Bewegung, Stressprävention, Ernährung und Ergonomie am Arbeitsplatz auf dem Programm.

// Staff development

Thanks to its forward-looking topics, its working conditions, the collegial working atmosphere and the many prospects for personal development, ZSW is an attractive employer.

Employee capacity increased from 216 to 219 full-time equivalents in 2017. This corresponds to 238 employees. With 82% of all staff active in the scientific and technical area, productivity remains at a stable high level.

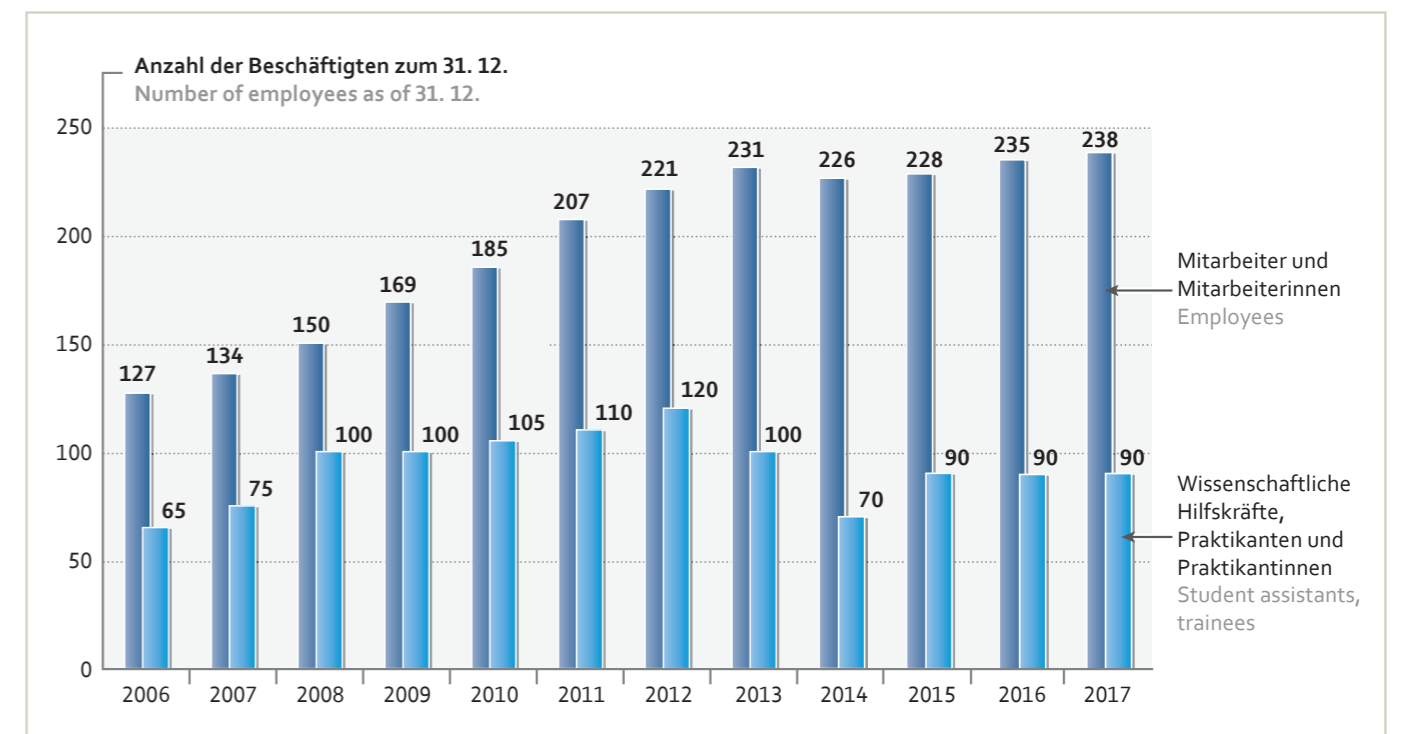
ZSW is also attractive to scientists from abroad. For example, a good 10% of all employees had a foreign nationality, they came from seven different countries.

Women constitute 22% of the staff. ZSW strives to increase this percentage of women employees, which is typical for technically-oriented research institutes, by offering working time models with maximum flexibility, which facilitate a good work-life balance.

Our highly-qualified and motivated employees are ZSW's key success factor. ZSW therefore offers a broad range of training and continuing professional development with both specialist and interdisciplinary content, as well as personal development and executive training. The employees are very interested in this offer: more than 30 events were held, with a total of 140 employee participants. Moreover, in the framework of the institute's corporate health management, ZSW once again offered numerous programmes on exercise, stress prevention, nutrition and workplace ergonomics.

Einen hohen Stellenwert nehmen die Vernetzung des ZSW mit Hochschulen, die Mitwirkung an der akademischen Ausbildung in Form von Vorlesungen, Seminaren und Praktika sowie die Betreuung von Studien- und Abschlussarbeiten ein. Daher waren 2017 neben den nach dem Tarifvertrag der Länder (TV-L) beschäftigten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 90 Studierende und Praktikanten am ZSW beschäftigt. Im Berichtsjahr fertigten 22 Doktorandinnen und Doktoranden ihre Dissertation an.

The institute prioritises networking with universities, active involvement of ZSW employees in academic education through providing lectures, seminars and practical training as well as supervising final theses and dissertations. As a result, in addition to the staff employees, ZSW also employed 90 students and interns in 2017. In the reporting year, 22 doctoral candidates completed their doctoral theses.



// Ausgewählte Veröffentlichungen

Selected Publications



// Veröffentlichungen in Büchern und Zeitschriften

Publications in Books and Journals

- / Arlt T. (HZB), Klages M., Messerschmidt M., Scholta J., Manke I. (HZB); **Influence of artificially aged gas diffusion layers on the water management of polymer electrolyte membrane fuel cells analyzed with in-operando synchrotron X-ray imaging**; Energy 118 (2017), 502-511; <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.061>
- / Balasubramanian P., Mancini M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Facile synthesis and electrochemical investigation of $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{P}_2\text{O}_7)_2(\text{PO}_4)_2$ as high voltage cathode for Li-ion batteries**; Journal of The Electrochemical Society 164 (1) A 6047-A6053 (2017); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0071701jes>
- / Baten T. (EEFA), Buttermann H.-G. (EEFA), Nieder T.; **Kraft-Wärme-Kopplung 2008 bis 2016 – Einfluss der Bilanzgrenze**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 12/2017, S. 69-74
- / Bauer M., Rieger B. (TUM), Schindler S. (HIU), Keil P. (TUM), Wachtler M., Danzer M. (Univ. Bayreuth), Jossen A. (TUM); **Multi-phase formation induced by kinetic limitations in graphite-based lithium-ion cells: Analyzing the effects on dilation and voltage response**; Journal of Energy Storage, 10C (2017) 1-10; <http://doi.org/10.1016/j.est.2016.11.006>
- / Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Kindl V., Lenz U., Sichler P., Steiert S.; **Verbundprojekt „P2G-Elektrolyse“ Entwicklungsarbeiten zur alkalischen Elektrolyse zwecks Umwandlung von elektrischem Strom in Wasserstoff, ZSW-Teilvorhaben**; Abschlussbericht, Stuttgart, August 2017
- / Fischer P., Schwarz R., Marinaro M., Wachtler M., Jörissen L.; **Investigation of the electrochemical oxygen reduction reaction in non-aqueous, magnesium-ion-containing electrolytes for magnesium air batteries**; ECS Transactions 75 (22) (2017) 3-12; <http://dx.doi.org/10.1149/07522.0003ecst>
- / Gabrielli G., Marinaro M., Mancini M., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **A new approach for compensating the irreversible capacity loss of high-energy $\text{Si/C|LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_2$ lithium-ion batteries**; Journal of Power Sources 351 (2017) 35-44; <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.051>
- / Hariskos D., Powalla M.; **Thermodynamic limitations for alkali metals in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$** ; Journal of Materials Research, 32 (2017) 3789-3802; <http://dx.doi.org/10.1557/jmr.2017.394>
- / Ince U. (HZB), Markötter H. (HZB), George M. (Univ. of Toronto), Liu H. (Univ. of Toronto), Ge N. (Univ. of Toronto), Lee J. (Univ. of Toronto), Alrwashdeh S. (HZB), Zeis R. (KIT), Messerschmidt M., Scholta J., Bazylak A. (Univ. of Toronto), Manke I. (HZB); **Effects of compression on water distribution in gas diffusion layer materials of PEMFC in a point injection device by means of synchrotron X-ray imaging**; International Journal of Hydrogen Energy 43 (2018) 391-406; <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.047>
- / Iturrondobeitia A. (CIC), Aguesse F. (CIC), Genies S. (CEA), Waldmann T., Kasper M., Ghanbari N., Wohlfahrt-Mehrens M., Bekaert E. (CIC); **Post-mortem analysis of calendar aged 16 Ah NMC/graphite pouch cells**; Journal of Physical Chemistry C 2017, 121, 21865-21867; <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b05416>
- / Kannan A. (DTU), Kabza A., Kaczerowski J., Scholta J.; **Operation strategies based on carbon corrosion and lifetime investigations for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stacks**; Fuel Cells, accepted for publication 17 Nov. 2017
- / Kinyanjui M. (Univ. Ulm), Axmann P., Mancini M., Gabrielli G., Balasubramanian P., Boucher F. (Univ. Nantes), Wohlfahrt-Mehrens M., Kaiser U. (Univ. Ulm); **Understanding the spectroscopic signatures of Mn valence changes in the valence energy loss spectra of Li-Mn-Ni-O spinel oxides**; Physical Review Materials 1, 074402 (2017); <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.074402>
- / Kriston A. (JRC), Pfrang A. (JRC), Döring H., Fritsch B., Ruiz V. (JRC), Adanouj I. (JRC), Kosmidou T. (JRC), Ungeheuer J. (JRC), Boon-Brett L. (JRC); **External short circuit performance of graphite- $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ and graphite- $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ cells at different external resistances**; Journal of Power Sources 361 (2017) 170-181; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.06.056>
- / Löffler M.-S., Brinner A., Schiller G. (DLR); **Forschen für nachhaltige Mobilität: Strombasierten Wasserstoff wirtschaftlich machen**; gwf G+Energie, 11/2017
- / Löschel A. (Univ. Münster), Erdmann G. (TU Berlin), Staiß F., Ziesing H.-J. (AGEB); **Stand der Energiewende und wichtige Handlungsfelder**; Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 12/2017, S. 34-38
- / Mancini M., Fleischhammer M., Fleischhammer S., Diemant T. (Univ. Ulm), Behm R. (Univ. Ulm), Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Investigation on the thermal stability of $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ -based cathodes for Li-ion batteries: Effect of electrolyte and state of charge**; Energy Technology, 2017, 5, 1561-1570; <http://dx.doi.org/10.1002/ente.201600780>
- / Mancini M., Gabrielli G., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electrochemical performance and phase transitions between 1.5 and 4.9 V of highly-ordered $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ with tailored morphology: Influence of the lithiation method**; Journal of The Electrochemical Society 164 (1) A6229-A6235 (2017); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0291701jes>
- / Marinaro M., Yoon D., Gabrielli G., Stegmaier P. (3M), Figgemeier E. (3M), Spurk P. (Umicore), Nelis D. (Umicore), Schmidt G. (Arkema), Chauveau J. (Arkema), Wohlfahrt-Mehrens M.; **High performance 1.2 Ah Si-alloy/Graphite| $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ prototype Li-ion battery**; Journal of Power Sources 357 (2017) 188-197; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.05.010>
- / Menner R., Paetel S., Wischmann W., Powalla M.; **Indium zinc oxide (IZO) window layer for high-efficiency $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells**; Thin Solid Films 634, 160-164 (2017) (Tagungsband zu TCM 2016, 6th Int. Symp. on Transparent Conductive Materials, 9-13 Oct. 2016); <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2017.02.018>
- / Mohanta P., Glöckler C., Orozco Arenas A., Jörissen L.; **Sb doped SnO_2 as a stable cathode catalyst support for low temperature polymer electrolyte membrane fuel cell**; International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 27950-27961; <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.064>
- / Pätzold U. (IMEC), Jaysankar M. (IMEC), Gehlhaar R. (IMEC), Ahlswede E., Paetel S., Qiu W. (IMEC), Bastos J. (IMEC), Rakocevic L. (IMEC), Richards B. (KIT), Aernouts T. (IMEC), Powalla M., Poortmans J. (IMEC); **Scalable perovskite/CIGS thin-film solar module with power conversion efficiency of 17.8%**; Journal of Materials Chemistry A 2017, 5, 9897-9906; <http://dx.doi.org/10.1039/C7TA01651D>
- / Powalla M., Paetel S., Hariskos D., Würz R., Kessler F., Lechner P., Wischmann W., Friedlmeier T.; **Advances in cost-efficient thin-film photovoltaics based on $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$** ; CAE Chinese Academy of Engineering, Special Issue „Clean Energy“ 1321-1326 (2017)
- / Saidani F. (IMS CHIPS), Hutter F. (IMS CHIPS), Scurtu R., Braunwarth W., Burghartz J. (IMS CHIPS); **Lithium-ion battery models: A comparative study and a model-based powerline communication**; Advances in Radio Science 15, 83-91, 2017; <http://dx.doi.org/10.5194/ars-15-83-2017>
- / Schnabel T., Seboui M., Ahlswede E.; **Evaluation of different metal salt solutions for the preparation of solar cells with wide-gap $\text{Cu}_2\text{ZnGeS}_4\text{Se}_{4-x}$ absorbers**; RSC Advances, 2017, 7, 26-30; <http://dx.doi.org/10.1039/C6RA23068G>
- / Secchiarioli M., Calcaterra S., Tran H.Y., Rezvani S.J. (Univ. Camerino), Nobili F. (Univ. Camerino), Marassi R. (Univ. Camerino), Wohlfahrt-Mehrens M., Dsoke S.; **Development of non-fluorinated cathodes based on $\text{Li}_3\text{V}_{1.95}\text{Ni}_{0.05}(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ with prolonged cycle life: A comparison among Na-alginate, Na-carboxymethyl cellulose and poly(acrylic acid) binders**; Journal of The Electrochemical Society 164 (4) A672-A683 (2017); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0781704jes>
- / Sehnke F., Kaifel A., Deissenroth M. (DLR), Lorenz E. (ISE), Dobschinski J. (IWES), Klann U. (IZES); **Bedeutung von Prognosen für die Energiewende**; FVEE-Themen, Forschung für die Energiewende – Die Gestaltung des Energiesystems, Tagungsband, Berlin, März 2017, S. 41-46
- / Tahir M. (HIU), Weinberger M. (HIU), Balasubramanian P., Diemant T. (Univ. Ulm), Behm R. (Univ. Ulm), Linden M. (Univ. Ulm), Wohlfahrt-Mehrens M.; **Silicon carboxylate derived silicon oxycarbides as anodes for lithium ion batteries**; Journal of Materials Chemistry A 2017, 5, 10190-10199; <http://dx.doi.org/10.1039/C7TA01843F>
- / Wahl T., Hanisch J., Meier S., Schultes M., Ahlswede E.; **Sputtered indium zinc oxide rear electrodes for inverted semi-transparent perovskite solar cells without using a protective buffer layer**; Organic Electronics, 54 (2018) 48-53; <http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2017.12.020>
- / Waldmann T., Quinn J., Richter K., Kasper M., Tost A., Klein A., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Electrochemical, post-mortem and ARC analysis of Li-ion cell safety in second-life applications**; Journal of The Electrochemical Society 164 (13) A3154-A3162 (2017); <http://dx.doi.org/10.1149/2.0961713jes>
- / Waldmann T., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Effects of rest time after Li plating on safety behavior - ARC tests with commercial high-energy 18650 li-ion cells**; Electrochimica Acta Volume 230, 10 March 2017, 454-460; <http://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.02.036>
- / Witte W., Carron R. (empa), Hariskos D., Fu F. (empa), Menner R., Buecheler S. (empa); **IZO or IOH window layers combined with $\text{Zn}(\text{O,S})$ and CdS buffers for $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells**; Physica Status Solidi A, 2017, 214, 1700688; <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201700688>
- / Zuberbühler U., Specht M., Stürmer B., Thaler S., Brinner A., Steiert S., Otten R. (Audi); **ZSW-Teilvorhaben Wirkungsgradoptimierung von Methanisierungs- und Biogasanlagen-Technologie im Rahmen eines EE-Speicherungs-Pilotprojekts**; WOMBAT Schlussbericht, Dezember 2016

// Veröffentlichungen auf wissenschaftlichen Konferenzen, Workshops und Symposien

Publications at Scientific Conferences, Workshops and Symposia

- / Ahlswede E., Hanisch J., Schultes M., Wahl T.; **Advances in stacked $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ perovskite tandem solar cells**; 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix, 17-21 April 2017
- / Ansar A. (DLR), Brinner A., Bowen J. (DTU), Carmo M. (FZJ); **Raney-nickel alloy electrodes for alkaline water electrolysis**; ICE International Conference on Electrolysis, Copenhagen, 12-15 June 2017
- / Axmann P., Mancini M., Gabrielli G., Balasubramanian P., Wohlfahrt-Mehrens M.; **$\text{Li}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ spinel as promising high voltage and high capacity cathode material for lithium ion batteries**; 21st International Conference on Solid State Ionics, Padua, 18-23 June 2017
- / Axmann P., Marinaro M., Gabrielli G., Waldmann T., Hogg B.-I., Klein A., Memm M., Scurtu R., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Beiträge von Materialien und Elektrodendesign zur Energieeffizienz**; Batterieforum Deutschland, Berlin, 25.-27.1.2017
- / Bauer A., Hariskos D., Wischmann W.; **Increased VOC and FF in $\text{ZNO}_{1-x}\text{S}_x$ -buffered $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ solar cells by cadmium partial electrolyte treatment**; IEEE PVSC-44, Washington, 25-30 June 2017
- / Bauer A., Schultes M., Meier S., Hanisch J., Ahlswede E., Menner R., Wischmann W., Powalla M.; **CIGS/Perovskit-Tandemsolarzellen: Ein perfektes Paar?**; 2. EFDS-Seminar, Fraunhofer IKTS, Dresden, 16.5.2017
- / Bauer M., Schindler S. (HIU), Cheetamun H., Danzer M.; **Design of optimized current profiles for fast charging of lithium-ion batteries**; 9th International Symposium „Advanced Battery Power – Automotive and Energy Supply Solutions“, Aachen, 29-30 March 2017
- / Baumgart F., Brinner A., Feigl B., Kindl V., Lenz U., Sichler P., Steiert S.; **Entwicklung der alkalischen Elektrolysetechnik für P2G-Anwendungen im ZSW**; Kolloquium des Instituts IE3 des Forschungszentrums Jülich, 19.1.2017
- / Böse O., Asante J., Fuchs B., Jörissen L.; **Ultra high power $\text{Ni}(\text{OH})_2$ cell for hybrid electric vehicle application**; EVS30 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stuttgart, 9-11 Oct. 2017
- / Döring H.; **Investigation of the efficiency of fire extinguishing agents for Li-battery fire**; 3rd International Automotive Battery Safety Summit, Berlin, 25-27 April 2017
- / Döring H.; **Results for the fire extinguishing tests on Li-batteries**; 13. Battery Experts Forum, Aschaffenburg, 15-16 March 2017
- / Döring H., Wörz M., Rohozneanu O., Spachmann K., Klee-Barillas J.; **Results for fire extinguishing tests on Li-batteries**; 4. Deutsche Photovoltaikbetriebs- und Sicherheitstagung, Berlin, 19.-20.10.2017

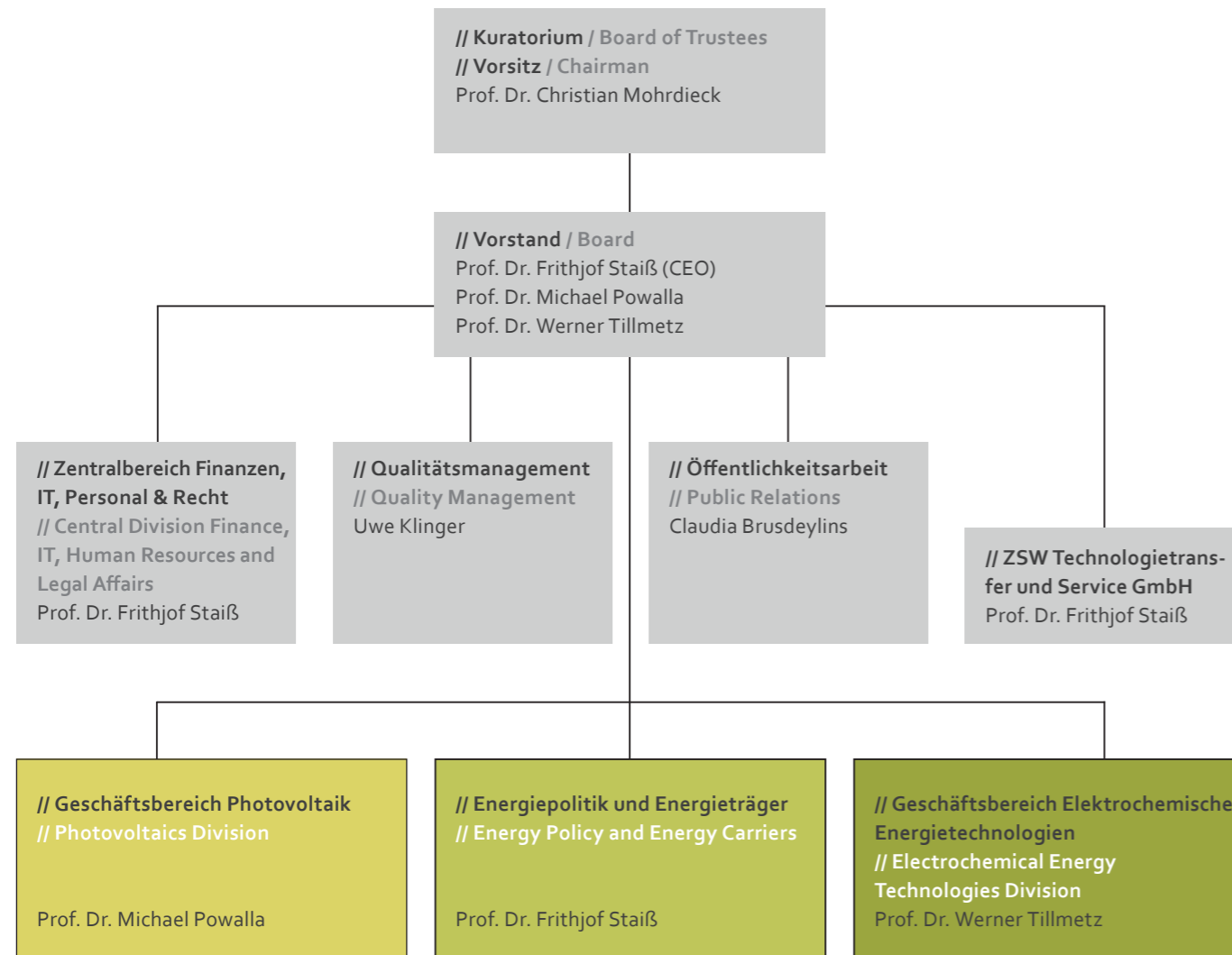
// Ausgewählte Veröffentlichungen Selected Publications

- / Dsoke S., Secchiaroli M., Gucciardi E., Tran H.-Y., Fuchs B., Calcaterra S., Wohlfahrt-Mehrens M.; **Materials selection for asymmetric/hybrid supercapacitors**; AABC 2017, Mainz, 30 Jan. - 2 Feb. 2017
- / Evangelisti C., Jörissen L.; **Progress on research regarding electrolyte additive for alkaline zinc-air battery**; E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, 21-26 May 2017
- / Evangelisti C., Jörissen L.; **LuZi: Secondary zinc air battery development and characterisation**; ees Europe, München, 31 May - 2 June 2017
- / Evangelisti C., Yazili D., Jörissen L.; **Study for substituting PbO with environmentally friendlier substances in zinc-air battery**; Metal Air Batteries International Congress, Huesca, 4-7 June 2017
- / Fischer P., Schwarz R., Marinaro M., Wachtler M., Jörissen L.; **Investigations on the oxygen reduction $Mg(ClO_4)_2$ and DMSO for magnesium-oxygen batteries**; Batterieforum Deutschland, Berlin, 25.-27.1.2017
- / Geyer D.; **Bridging the gap between technical and architectural requirements – Experience from the planning and construction phase of the CIGS façade at the new ZSW building**; Advanced Building Skins, Bern, 2-3 Oct. 2017
- / Hanisch J., Wahl T., Ahlswede E.; **Comparison of the aluminium back contact deposited by sputtering, e-beam or thermal evaporation for inverted perovskite solar cells**; 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 25-29 Sept. 2017
- / Hariskos D., Witte W., Paetel S., Hempel W., Powalla M.; **Cd-free $Cu(In,Ga)Se_2$ thin-film solar cells with high Ga contents**; 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 25-29 Sept. 2017
- / Hempel W., Wischmann W.; **Improved GDOES depth profiling of CIGS solar cells by adding nitrogen to argon sputter gas**; 17th ECASIA, Montpellier, 24-29 Sept. 2017
- / Kabza A., Jörissen L., Knaupp H., Schätzle M., Hunger J.; **Challenges of automotive fuel cell stack testing**; EVS30 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stuttgart, 9-11 Oct. 2017
- / Klages M., Gogel V., Kardjilov N., Scholta J., Jörissen L.; **Experimental investigation of optimized anodic DMFC flow field**; 647th WE-Heraeus-Seminar on Next Generation PEM Fuel Cells: Strategic Partnerships for Tackling Multiscale Challenges, Bad Honnef, 2-5 July 2017
- / Klee Barillas J., Danzer M. (Univ. Bayreuth); **Performance-Analyse von PV-Batteriespeichern auf der Basis verschiedener Messverfahren**; 24. Design&Elektronik-Entwicklerforum, München, 15.-16.2.2017
- / Kogler W., Schnabel T., Bauer A., Spiering S., Ahlswede E., Powalla M.; **Investigation and optimization of Cd-free buffer layers In_2S_3 and $Zn(O,S)$ for $Cu_2ZnSn(S,Se)_4$ -based solar cells**; IEEE PVSC-44, Washington, 25-30 June 2017
- / Lechner P., Schnepf J., Stellbogen D.; **Performance characterisation and extended reliability testing of CIGS PV modules**; 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 25-29 Sept. 2017, p. 1004-1009; <http://dx.doi.org/10.4229/EUPVSEC20172017-3AO.8.1>
- / Löffler M.-S., Specht M.; **Aktivitäten im Bereich Power-to-X: Das Leuchtturmprojekt Power-to-Gas Baden-Württemberg**; Cluster Brennstoffzelle Baden-Württemberg, Stuttgart, 14.9.2017
- / Marinaro M., Yoon D., Axmann P., Wohlfahrt-Mehrens M., Figgemeier E. (3M), Stegmaier P. (3M), Schmidt G. (Arkema), Chauveau J. (Arkema), Spurk P. (Umicore), Nelis D. (Umicore); **Increasing the energy of prototype Li-ion batteries through utilization of Ni-rich NMC cathodes and Si-alloy based anodes**; E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, 22-26 May 2017
- / Marini E., Evangelisti C., Jörissen L.; **A bifunctional air electrode with a carbon free active layer for rechargeable Zn-air batteries**; GdCh-Wissenschaftsforum Chemie 2017, Berlin, 10-14 Sept. 2017
- / Matthiä B., Gaedke P., Felder M., Binder J.; **Probabilistic loadflow methods for energy management schemes in distribution grids**; IEEEIC 2017, 17th International Conference on Environmental and Electrical Engineering, Milano, 6-9 July 2017
- / Menner R., Friedlmeier T., Paetel S., Jackson P., Wischmann W.; **Amorphous indium zinc oxide windows of different composition for $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells**; 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 25-29 Sept. 2017
- / Messerschmidt M., Appelrath M., Scholta J.; **Artificial ageing of PEMFC GDL**; 14th Symposium on Fuel Cell and Battery Modelling and Experimental Validation – ModVal14, Karlsruhe, 2 March 2017
- / Messerschmidt M., Bergbreiter C., Enz S., Klages M., Penga Z., Scholta J.; **CFD modelling as a validated tool to understand and develop PEMFCs**; 14th Symposium on Fuel Cell and Battery Modelling and Experimental Validation – ModVal14, Karlsruhe, 2 March 2017
- / Messerschmidt M., Gogel V., Scholta J., Jörissen L.; **Flow field optimization for a DMFC application**; 647th WE-Heraeus-Seminar on Next Generation PEM Fuel Cells: Strategic Partnerships for Tackling Multiscale Challenges, Bad Honnef, 2-5 July 2017
- / Mohanta P., Regnet F., Jörissen L.; **Feasibility of doped metal oxides and graphitized carbon as a stable cathode catalyst support for low temperature polymer electrolyte membrane fuel cell**; EFC2017 – European Fuel Cell Technology & Applications Conference, Naples, 12-15 Dec. 2017
- / Mohseninia A., Kartouzian D., Markötter H. (HZB), Kardjilov N. (HZB), Scholta J., Manke I. (HZB); **Influence of the MEA design and gas distribution concepts on water distribution and transport inside PEMFCs using neutron imaging**; FDFC 2017 – 7th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells, Stuttgart, 31 Jan. - 2 Feb. 2017
- / Pournemat A., Wilhelm F., Markötter H. (HZB), Kropf H. (HZB), Manke I. (HZB), Scholta J.; **Nano-scale Monte Carlo study on liquid water distribution within the PEMFC MPL, CL and their interfacial region**; FDFC 2017 – 7th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells, Stuttgart, 31 Jan. - 2 Feb. 2017
- / Püttner A.; **Veränderungen im Ranking – Bundesländerergebnisse im Detail; Bundesländervergleich Erneuerbare Energien – wie steht es um die föderale Energiewende?**; Ergebnispräsentation von AEE, DIW und ZSW, Berlin, 16.11.2017
- / Schmidt M.; **Anforderungen an eine konsequente Energiewendepolitik auf Basis des Monitoring-Prozesses zur „Energie der Zukunft“**; International Renewable Energy Storage Conference (IRES) 2017, Düsseldorf, 15.3.2017
- / Schmidt M.; **Energie der Zukunft – Zukunft der Energie**; Sommeruni der IG Metall Esslingen, Pilsen, 28.5.2017
- / Schmidt M.; **Anforderungen an eine konsequente Energiewendepolitik auf Basis des Monitoring-Prozesses „Energie der Zukunft“**; Jahrestagung Sektor-kopplung: Sektorübergreifende Transformation unseres Energiesystems Energienetze, Quartierslösungen, Industrieanwendungen, Düsseldorf, 18.9.2017
- / Schmidt M.; **Shaping the Energy Transition – Working on the edge of science and politics**; 5th PHD-Candidate Seminar of Darmstadt Graduate School of Excellence Energy Science and Engineering, Annweiler, 28.9.2017
- / Schmidt M.; **Sector coupling – the pathway to 95% greenhouse gas reduction**; EVS30 - International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stuttgart, 9-11 Oct. 2017
- / Schmidt M., Kelm T.; **Energiewende und Versorgungssicherheit in Baden-Württemberg – Monitoringbericht 2016**; IHK-Informationsveranstaltungsreihe zur Versorgungssicherheit, Heilbronn, 7.2.2017, Karlsruhe, 2.3.2017, Stuttgart, 27.3.2017
- / Schmidt M., Kelm T., Fuchs A., Nitsch J., Mellwig P. (Ifeu), Bergk F. (Ifeu), Bürger V. (Öko-Institut), Wiegmann K. (Öko-Institut), Fleiter T. (FHG ISI), Maaß C. (Hamburg Institut); **„Energie- und Klimaschutzziele 2030“**; Vorstellung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens; Abschluss-symposium, Stuttgart, 27.9.2017
- / Schnabel T., Seboui M., Ahlswede E.; **Tuning of stoichiometry and band gap of solution-processed $Cu_2ZnGeS_xSe_{4-x}$ absorbers for thin-film solar cells**; 2017 MRS Spring Meeting & Exhibit, Phoenix, 17-21 April 2017
- / Scholta J., Kabza A., Kaczerowski J., Kannan A.; **Operation strategies based on carbon corrosion and lifetime investigations for high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stacks**; FDFC 2017 – 7th International Conference on Fundamentals and Development of Fuel Cells, Stuttgart, 31 Jan. - 2 Feb. 2017
- / Staiß F., Schmidt M.; **Ansatzpunkte und Ziele der Klimaschutzpolitik**; Kommunaler Klimaschutzkongress Baden-Württemberg 2017, Stuttgart, 29.11.2017
- / Staiß F., Schmidt M., Schwarz S., Wassermann S. (Zirius), Sonnberger M. (Zirius); **Technik trifft Mensch – Mensch trifft Technik**; Stuttgarter Energie-dialog, Stuttgart, 24.3.2017
- / Stellbogen D., Lechner P.; **Determination of degradation rates for PV modules and PV generators applying various methods**; 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 25-29 Sept. 2017, p. 1805-1808; <http://dx.doi.org/10.4229/EUPVSEC20172017-5DV.3.25>
- / Wischmann W.; **PV Recycling**; Roadmap Umwelttechnik: Den Märkten der Zukunft auf der Spur, Stuttgart, 11.5.2017
- / Witte W., Carron R. (empa), Hariskos D., Fu F. (empa), Menner R., Buecheler S. (empa); **Indium zinc oxide and hydrogen-doped indium oxide window layers combined with $Zn(O,S)$ and CdS buffers for $Cu(In,Ga)Se_2$ thin-film solar cells**; E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, 22-26 May 2017
- / Witte W., Jackson P., Hariskos D., Kessler F., Buecheler S. (empa), Carron R. (empa), Avancini E. (empa), Bissig B. (empa), Weiss T. (empa), Siebentritt S. (Univ. Luxemburg), Werner F. (Univ. Luxemburg), Wolter M. (Univ. Luxemburg), Pareige P. (Univ. Rouen), Duguay S. (Univ. Rouen), Cadel E. (Univ. Rouen), Castro C. (Univ. Rouen), Vilalta-Clemente A. (Univ. Rouen), Menozzi R. (Univ. Parma), Sozzi G. (Univ. Parma), Bourgeois E. (IMEC), Degutis G. (IMEC), Bär M. (HZB), Wilks R. (HZB), Kunze T. (HZB), Sadewasser S. (INL), Nicoara N. (INL), Puska M. (Aalto Univ.), Fedina M. (Aalto Univ.), Komsa H.-P. (Aalto Univ.), Havu V. (Aalto Univ.), Reinhard P. (Flisom), Dimmler B. (MCT), Wächter R. (MCT), Tiwari A. (empa); **Influence of post-deposition treatment with alkali elements on bulk and interface properties of high efficiency $Cu(In,Ga)Se_2$ solar cells: Results of EU project Sharc25**; 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, 25-29 Sept. 2017
- / Witte W., Jackson P., Hariskos D., Kessler F., Powalla M., Buecheler S. (empa), Carron R. (empa), Avancini E. (empa), Bissig B. (empa), Weiss T. (empa), Siebentritt S. (Univ. Luxemburg), Werner F. (Univ. Luxemburg), Wolter M. (Univ. Luxemburg), Pareige P. (Univ. Rouen), Moguerou P. (Univ. Rouen), Duguay S. (Univ. Rouen), Cadel E. (Univ. Rouen), Castro C. (Univ. Rouen), Vilalta-Clemente A. (Univ. Rouen), Menozzi R. (Univ. Parma), Sozzi G. (Univ. Parma), Di Napoli S. (Univ. Parma), Bourgeois E. (IMEC), Degutis G. (IMEC), Gehlhaar R. (IMEC), Bär M. (HZB), Wilks R. (HZB), Kunze T. (HZB), Sadewasser S. (INL), Nicoara N. (INL), Puska M. (Aalto Univ.), Fedina M. (Aalto Univ.), Komsa H.-P. (Aalto Univ.), Havu V. (Aalto Univ.), Reinhard P. (MCT), Dimmler B. (MCT), Wächter R. (MCT), Tiwari A. (empa); **Measures to increase CIGS cell efficiency towards 25%**; Nextgen 2017 – Nanotechnology and Next Generation High-Efficiency Photovoltaics International School and Workshop, Palma de Mallorca, 12-15 Sept. 2017
- / Wohlfahrt-Mehrens M.; **High energy batteries: from materials research to complete cells**; MOST-BMBF-Batterieworkshop, Tainan, 6-8 Feb. 2017
- / Wohlfahrt-Mehrens M., Axmann P., Gabrielli G., Mancini M., Balasubramanian P.; **$LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_2$ as high voltage and high capacity cathode material: From synthesis to full cell application**; IBA, Nara, 5-10 March 2017
- / Zuberbühler U., Specht M.; **Power-to-Gas ($P_2G^®$)**; Erneuerbare Energie, Solarverein Rems-Murr, Friedrich-Ebert-Stiftung, Schorndorf, 9.5.2017

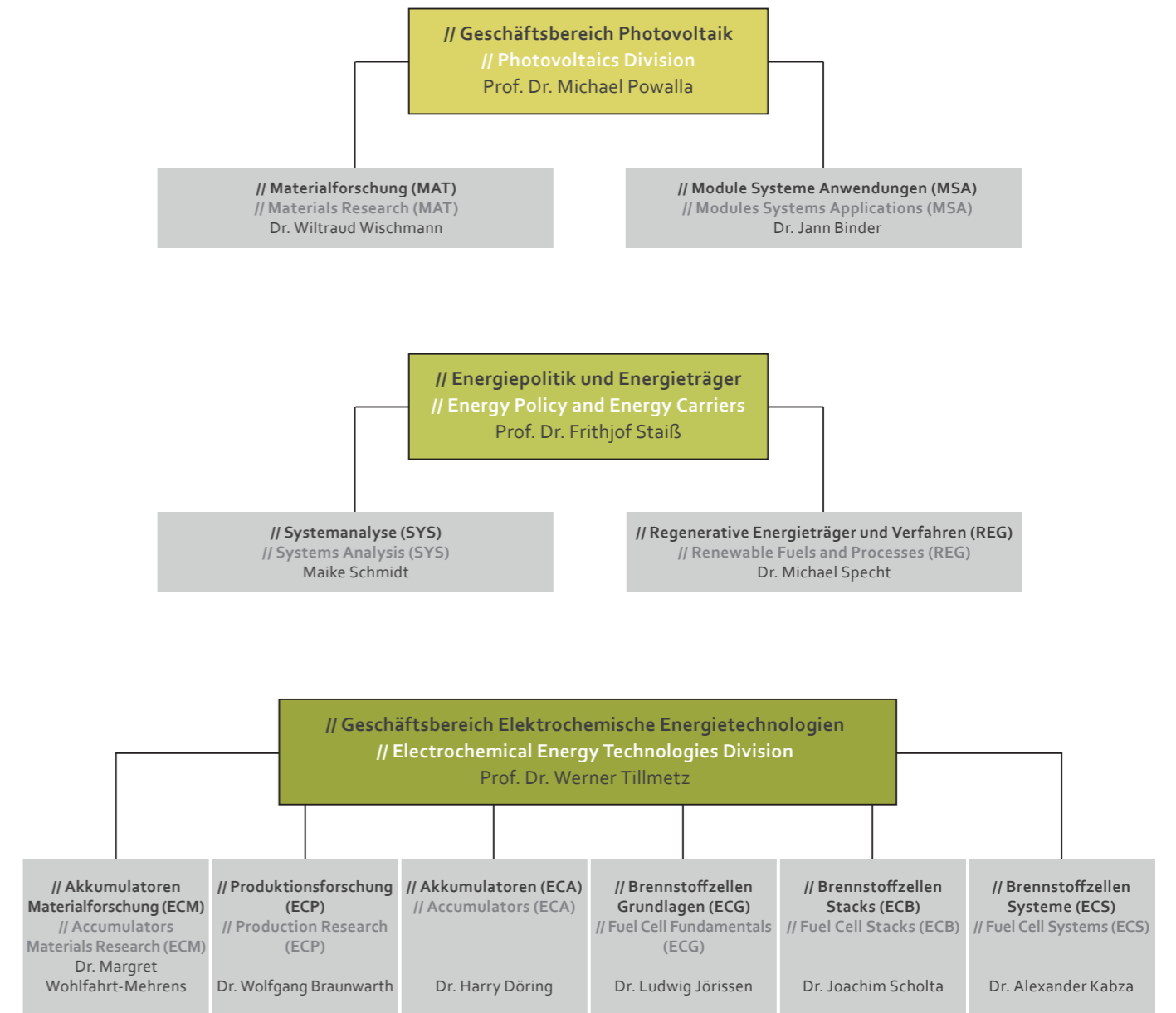
// Organigramme

Organisational Charts

// Organigramm des Instituts
// ZSW Organisational Chart



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



// Standorte

Locations

// Stuttgart



Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart

Ansprechpartner / Contact
Claudia Brusdeylins
Phone: +49 711 7870-278
E-mail: claudia.brusdeylins@zsw-bw.de

// Widderstall



Widderstall 14
89188 Merklingen

// Ulm



Helmholtzstraße 8
89081 Ulm

Ansprechpartner / Contact
Tiziana Bosa
Phone: +49 731 9530-601
E-mail: tiziana.bosa@zsw-bw.de

// Ulm eLaB



Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm

// Abkürzungen

Abbreviations

// Firmen, Institute, Institutionen

// Companies, Institutes, Institutions

AABC	Advanced Automotive Battery Conference
AEE	Agentur für Erneuerbare Energien
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e. V.
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung / German Federal Ministry of Education and Research
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CIC	Centro de Investigación Cooperativa (Cooperative Research Centre) energiGUNE
DIN EN	Deutsches Institut für Normung, Europäische Norm
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DOE	Department of Energy
DTU	Dänemarks Technische Universität – Technical University of Denmark
ECASIA	European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis
EEFA	Energy Environment Forecast Analysis GmbH & Co. KG
ees	Electrical Energy Storage (Fachmesse)
eLaB	ZSW Labor für Batterietechnologie
empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
E-MRS	European Materials Research Society
ERA	European Research Area
EU-PVSEC	European PV Solar Energy Conference and Exhibition
EVS	Electric Vehicle Symposium & Exhibition
FhG-ISI	Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
FZJ	Forschungszentrum Jülich GmbH
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
HIU	Helmholtz-Institut Ulm für elektrochemische Energiespeicherung
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IBA	International Battery Association
IEC	International Electrochemical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
IMEC	Interuniversity Microelectronics Center
IMS CHIPS	Institut für Mikroelektronik Stuttgart
INL	International Iberian Nanotechnology Laboratory
ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
IZES	Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH
JRC	Joint Research Center
KIT	Karlsruher Institut für Technologie / Karlsruhe Institute of Technology
MCT	Manz CIGS Technology GmbH
MRS	Materials Research Society
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH
Plansee	Plansee SE
PVSC	Photovoltaic Specialists Conference
TU	Technische Universität
TUM	Technische Universität München
Uppsala Univ.	Uppsala University
WBZU	Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e. V.
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süd
ZBT	Zentrum für Brennstoffzellentechnik GmbH
Zirius	Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung Universität Stuttgart

// Technische Begriffe

// Technical Terms

AC	Alternating Current / Wechselstrom
ARC	Accelerated Rate Calorimeter
BOL	Beginning of Life
BZ	Brennstoffzelle
CFD	Computational Fluid Dynamics
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CL	Catalyst Layer / Katalysatorschicht
CPV	Concentrating Photovoltaics
DC	Direct Current / Gleichstrom
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell / Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
ECSA	Electrochemically Active Surface Area / Elektrochemisch aktive Oberfläche
EDX	Energiedispersive Röntgen-Mikroanalyse
EVA	Ethylen-Vinyl-Acetat
F&E	Forschung und Entwicklung
FF	Fill Factor
FLOX	Flammenlose Oxidation / Flameless Oxidation
GDL	Gas Diffusion Layer / Gasverteilerschicht
GDOES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy / Optische Glimmladungsspektroskopie
HT	Hochtemperatur / high-temperature
ISO	International Organization for Standardization
LFP	Lithiumeisenphosphat / lithium iron phosphate
LMFP	Lithiummanganeisenphosphat / lithium manganese iron phosphate
LMO	Lithiummanganspinell / lithium manganese spinel
MEA	Membrane Electrode Assembly / Membran-Elektroden-Einheit
MPL	Micro Porous Layer / Mikroporöse Schicht
µ-CT	Mikro-Computertomografie / Micro-Computed Tomography
NCM	Nickel-Kobalt-Mangan / nickel cobalt manganese
PtG	Power-to-Gas
P2G®	Power-to-Gas
P2X	Power to X
PEM	Polymer Electrolyte Membrane / Polymerelektrolytmembran
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell / Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PV	Photovoltaik / Photovoltaics
R&D	Research and Development
RE	Renewable Energy
REM	Rasterelektronenmikroskop
RES	Renewable Energy Sources
SEM	Scanning Electron Microscope
SIMS	Sekundär-Ionen-Massenspektrometrie / Secondary Ion Mass Spectrometry
SOC	State of Charge / Ladungszustand
ToF	Time of Flight
VOC	Open-Circuit Voltage

// Mitgliedschaften

// ZSW is a member of



AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AKK	Arbeitskreis Kohlenstoff der Deutschen Keramischen Gesellschaft e. V.
BDSH e.V.	Bundesverband Deutscher Sachverständiger des Handwerks e.V.
BVES	Bundesverband Energiespeicher
CPN	Clean Power Net
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.
EUREC	European Renewable Energy Centres Agency
EWEA	European Wind Energy Association
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker
KLiB	Kompetenznetzwerk Lithium Ionen Batterien
N.ERGHY	New European Research Grouping (DLR)
performing energy	Fachkommission des DWV e.V. Power-to-Fuel
SmartGridsBW	Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V.
Solar Cluster	Solar Cluster Baden-Württemberg e. V.
Strategieplattform Power to Gas	(Deutsche Energie-Agentur GmbH)
STRise	Stuttgart Research Initiative on Integrated Systems Analysis for Energy
UNW	Ulmer Initiativkreis nachhaltige Wirtschaftsentwicklung e.V.
VDMA	Arbeitsgemeinschaft Brennstoffzellenforum im VDMA
Windcluster BW	Windcluster Baden-Württemberg
WindForS	Windenergie-Forschungscluster Süd
ZfES	Zentrum für Energieforschung Stuttgart

// Impressum

// Imprint

// Herausgeber Publisher

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

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Phone: +49 711 7870-0
Fax: +49 711 7870-100

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

// Redaktion Editors

Tiziana Bosa
Claudia Brusdeylins
Gudrun Scherg
Annette Stumpf
Ulrike Witt

// Layout & Satz Layout & Setting

Sieber & Wolf Werbeagentur
Hofgut Mauer 1
70825 Korntal-Münchingen
www.sieberundwolf.de



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

Stuttgart

Meitnerstraße 1
70563 Stuttgart
Germany
Phone: +49 711 7870-0
Fax: +49 711 7870-100

Solar-Testfeld Widderstall

Widderstall 14
89188 Merklingen
Germany
Phone: +49 7337 92394-0
Fax: +49 7337 92394-20

Ulm

Helmholtzstraße 8
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-0
Fax: +49 731 9530-666

Ulm eLaB

Lise-Meitner-Straße 24
89081 Ulm
Germany
Phone: +49 731 9530-500
Fax: +49 731 9530-599

www.zsw-bw.de



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