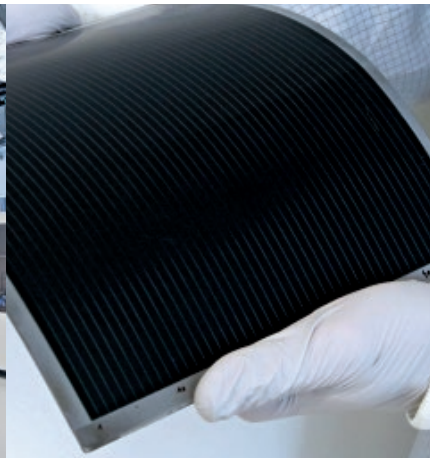


// Schlüsseltechnologien für die Energiewende

Key technologies for the energy turnaround

made in Germany

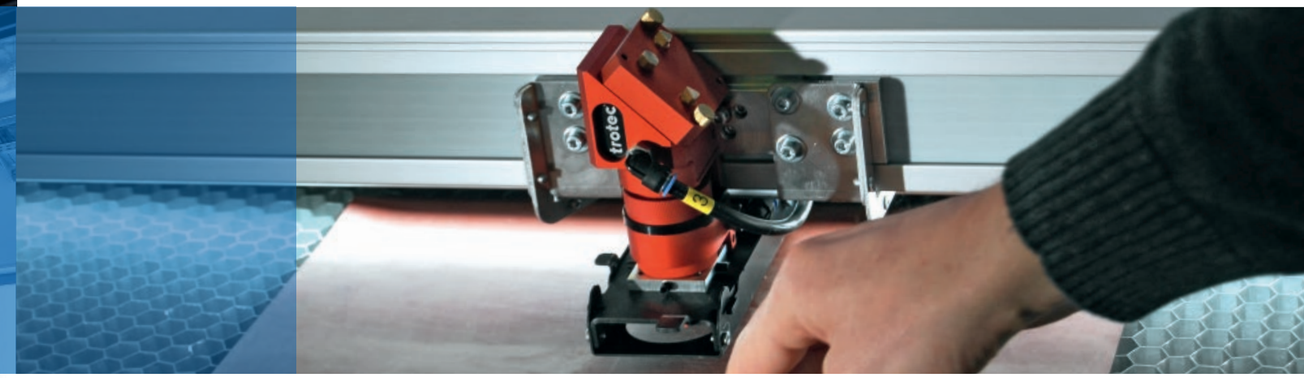
innBW INNOVATIONSALLIANZ BADEN-WÜRTTEMBERG

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg

ZSW

// Schlüsseltechnologien für die Energiewende „Made in Germany“

Key technologies for the energy turnaround “Made in Germany”



// Focus

// Industrielle Produktion von neuen Energietechnologien

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

// Industrial production of new energy technologies

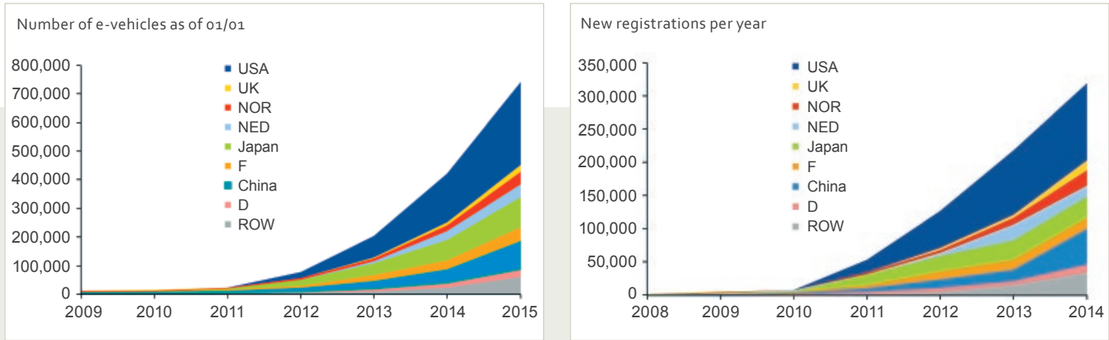
The successful implementation of the energy turnaround and the path to e-mobility will create significant opportunities for the German economy. This is because the energy turnaround is not only a driver of innovation par excellence, but, in addition, the innovative activity triggered is also compatible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

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

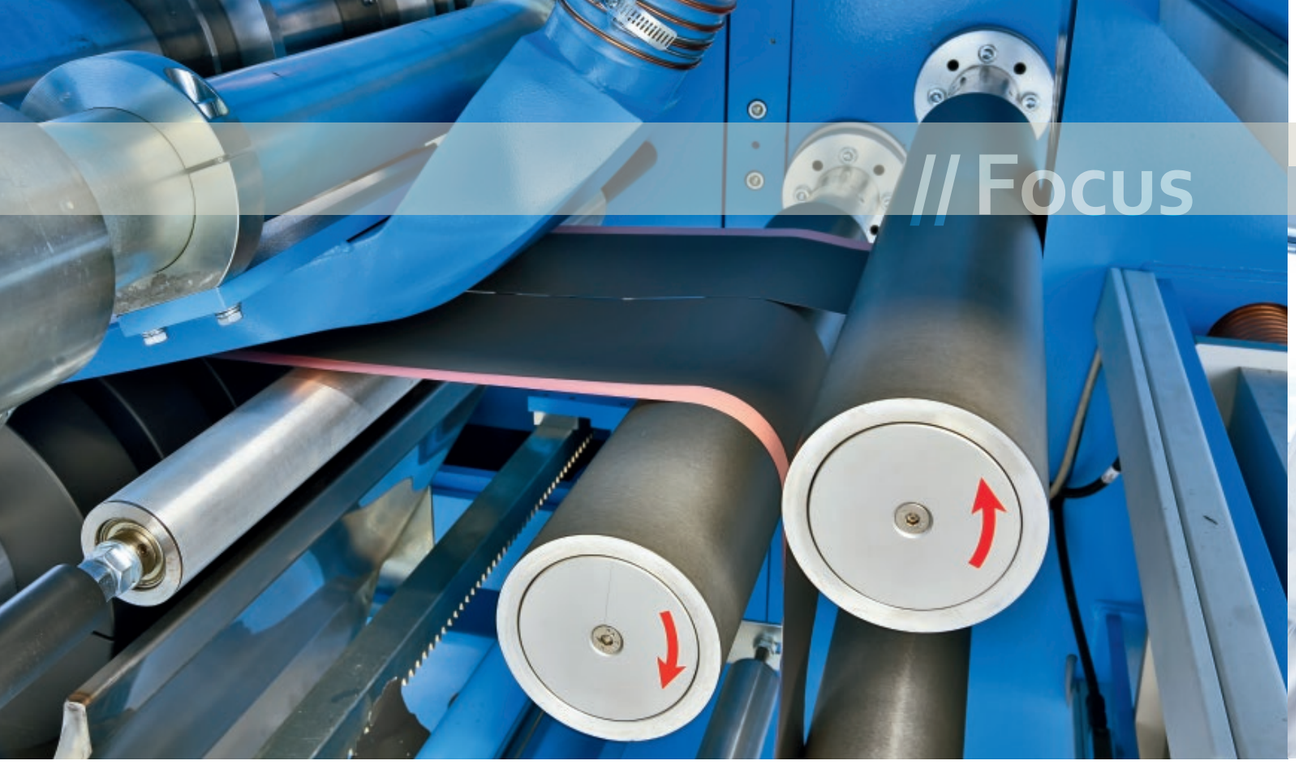
In vielen Bereichen der Energiewende verläuft die Entwicklung positiv. Neben der Strom- und Wärmewende brauchen wir aber auch eine Mobilitätswende. Dabei geht es im Sinne der Bundesregierung nicht zuletzt darum, Deutschland als Leitmarkt und Leitanbieter für die Elektromobilität zu etablieren. Trotz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

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

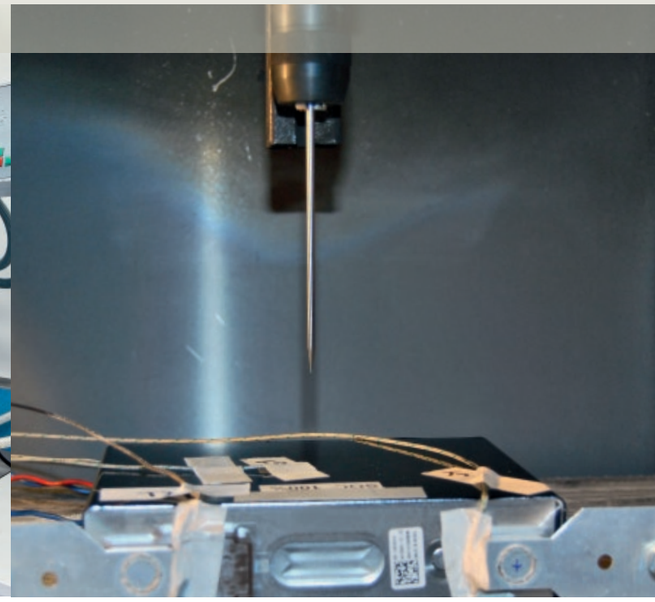
Developments in many areas of the energy turnaround are positive. However, in addition to the turnaround in electricity and heat, we also need a turnaround in mobility. From the perspective of the German Federal Government, this is not least about establishing Germany as a leading market and leading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



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



// Focus



// Batterien – Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert

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

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

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

// Batteries – key technology for the 21st century

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

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

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

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

Im Laborbereich wird zwar seit vielen Jahren intensiv an Lithium-Ionen-Technologien geforscht, aber über den Einfluss des Produktionsprozesses auf Qualität, Sicherheit und Herstellkosten gibt es noch zu wenig Wissen. Ebenso bedarf es neuer Produktionstechnologien für die Etablierung einer industriellen, seriennahen Produktion.

Decisive factors for marketable lithium-ion cells are their lifetime and performance. Research into innovative active materials has been ongoing in Germany for many years; nevertheless, new materials alone do not create good batteries. The interaction between electrode and electrolyte is also important. Furthermore, the correct particle morphology as well as the selected additives are decisive in terms of producing suitable electrodes. Cell design, quality and speed of the production processes determine the costs and quality of the product. And it is only the sophisticated durability and safety test that confirms whether a cell can fulfil the diverse requirements in practice.

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

// Die Qualität, Lebensdauer und Leistung der Elektrodenbänder sind entscheidend für die Lithium-Ionen-Zellen.
// The quality, lifetime and power of the electrodes are decisive for lithium-ion cells.

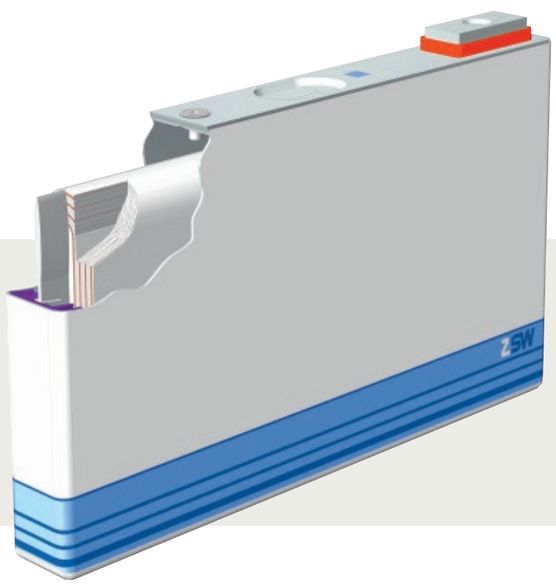
// Focus

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

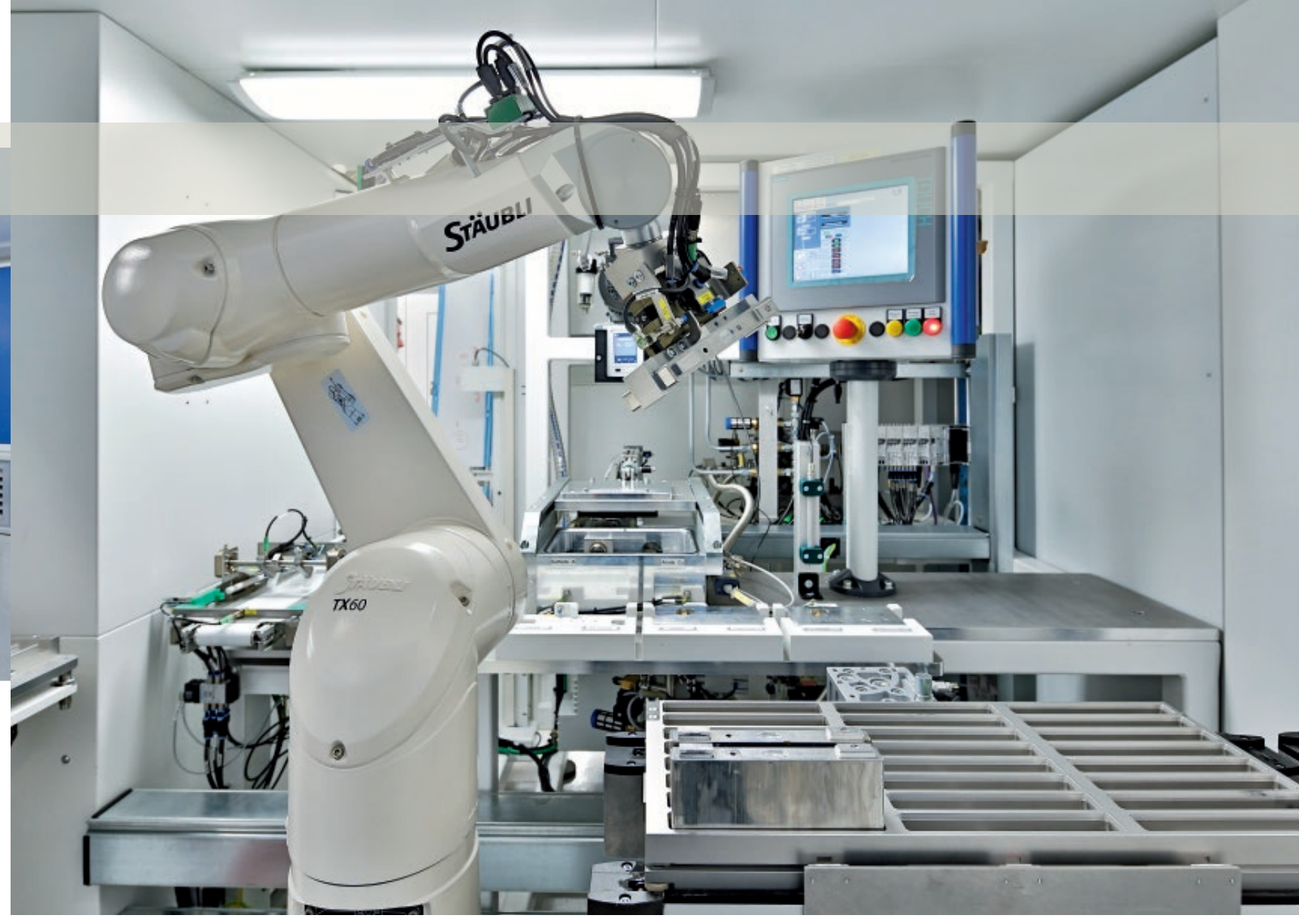
Mit der Ergänzung um die industriellen Produktionsanlagen sind jetzt alle Themenfelder der Batterieforschung auf 10.000 m² unter einem Dach untergebracht: die Materialforschung, die Elektroden- und Zelltechnologie, die Batteriesystemtechnik und das Batterietestzentrum. Damit gibt es am ZSW ein einmaliges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

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

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



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



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

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

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

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

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

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

// Focus

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

Das interdisziplinäre, hochqualifizierte Team garantiert nicht nur den zuverlässigen Betrieb der Anlagen, sondern unterstützt unsere Industriepartner auch bei Kostenbetrachtungen und neuen Methoden der Qualitätssicherung.

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

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

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

// Brennstoffzellen – die Markteinführung hat begonnen

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

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

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

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

// Fuel cells – the market launch has begun

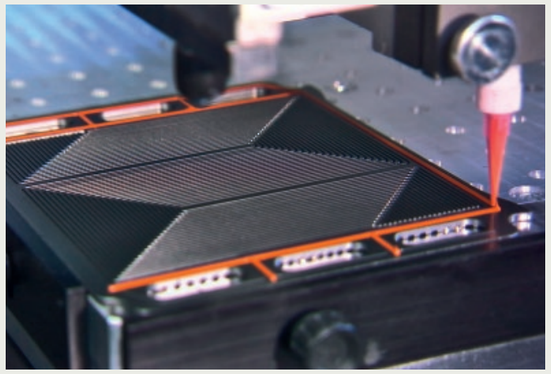
Fuel cell systems are increasingly being used as power and heat generators for residential applications, as uninterrupted power supply and as drive systems for material handling as well as for drive trains in cars and buses. In Japan, the broad market launch and industrial production of fuel cells has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

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

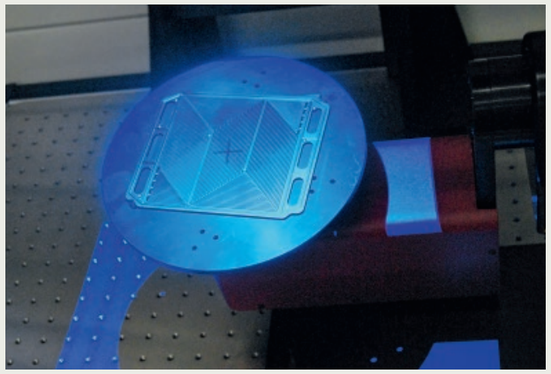
The installation of fuel cell stacks requires high quality and minimum tolerances with regard to the components to be installed as well as high precision levels during installation. The interval between two cells is frequently less than 1.5 mm, while the cell surface for automobile applications is approx.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

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

// Focus



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

// Photovoltaik der nächsten Generation

Die solare Stromgewinnung ist ein wichtiger Baustein der Energiewende. Solarzellen werden heute überwiegend aus kristallinem Silizium hergestellt. Demgegenüber weisen Dünnschicht-Technologien und hier insbesondere das Materialsystem CIGS (Cu(In,Ga) Se_2 = Kupfer, Indium und/oder Gallium sowie Selen) einige Vorteile auf: Neben einem deutlich geringeren Material- und Energieeinsatz (aufgrund der direkten Bandlücke) wird eine höhere Produktionstiefe vom Glas bis zum fertigen Modul in einer Fabrik erreicht. Diese Faktoren ermöglichen grundsätzlich geringere Herstellungskosten und damit die Chance, am wachsenden Weltmarkt für die Photovoltaik entscheidend zu partizipieren. Aufgrund der geringen Schichtdicke des Absorbers von 2–3 µm können zudem auch flexible Solarmodule hergestellt werden. Aus diesen Gründen hat sich das ZSW bei der Herstellung von Solarzellen und -modulen auf das Dünnschicht-Materialsystem CIGS spezialisiert.

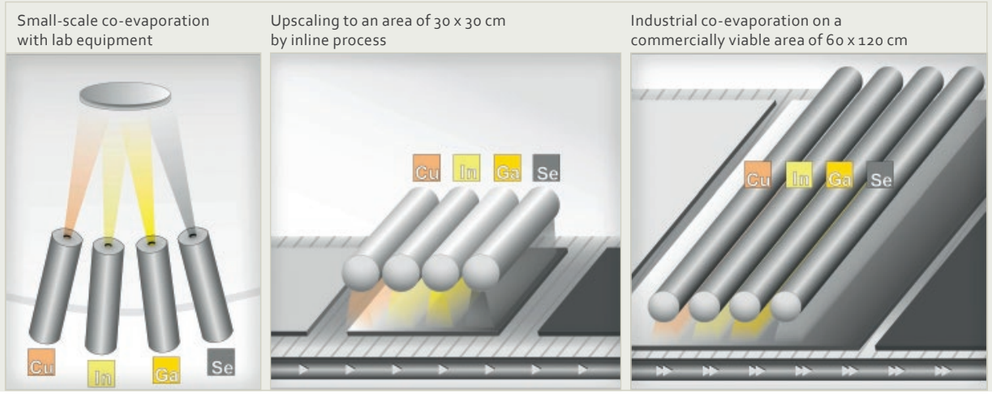
Nachdem 1989 an der Universität Stuttgart mit der Methode der Koverdampfung aller vier Metalle bereits Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 17 % auf kleiner Fläche gelangen, griff das ZSW diese vielversprechende Technologie auf und führte sie nach erfolgreicher Flächenskalierung zur kommerziellen Umsetzung.

// Next-generation photovoltaics

The obtaining of solar power is an important building block of the energy turnaround. Today, solar cells are produced predominantly from crystalline silicon. By contrast, thin-film technologies – and here in particular the CIGS material system (Cu(In,Ga) Se_2 = copper, indium and/or gallium as well as selenium) – offer certain advantages: In addition to a considerably lower material and energy input (due to the direct band gap), a higher production depth is achieved from the glass through to the finished module in a factory. These factors fundamentally enable lower manufacturing costs and thus the opportunity to participate in a decisive manner in the growing global market for photovoltaics. The successful thin absorber layer of 2-3 µm also enables the production of flexible solar modules. For these reasons, ZSW has specialised in the CIGS thin-film material system for the manufacture of solar cells and modules.

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

// Aufskalierung der Koverdampfung des CIGS-Dünnschicht-Halbleiters vom Labor bis zur Produktion.
// Upscaling of the co-evaporation of the CIGS thin-film semiconductor from lab through production.



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

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

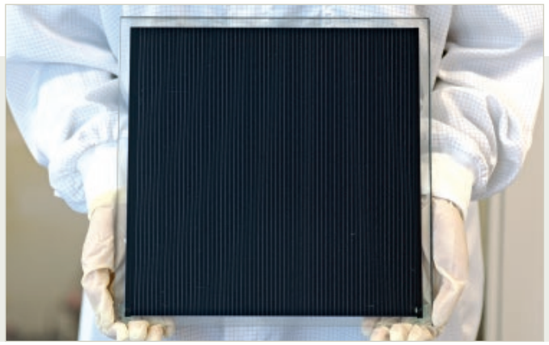
Die wesentlichen Ansatzpunkte für eine erfolgreiche Marktpositionierung industrieller Partner sind die kontinuierliche Verbesserung des Wirkungsgrades (durch angewandte Grundlagenforschung) sowie die Reduktion der spezifischen Investitionen in Produktionsanlagen (durch beschleunigte Prozessführung).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

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

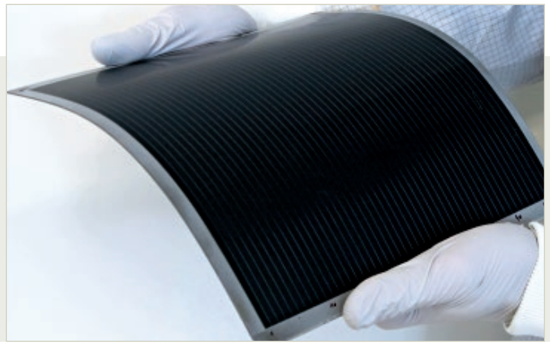
In addition to the upscaling of the surface area, the focus of the transition from the laboratory to the industrial environment was on plant engineering in particular. The challenge here is to produce the semiconductor and the contact layers at square metre substrate size instead of square centimetres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

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

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

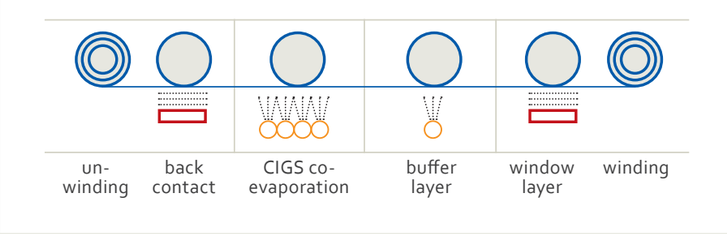


// Flexibles CIGS-Modul auf emailliertem Stahl.
// Flexible CIGS module on enamelled steel.



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

The required know-how concerning the process and the understanding of the building element are initially prepared on a square centimetre area in a CIGS laboratory facility (see the chart on page 26, top left). Here, ZSW holds the current efficiency world record for thin-film solar cells at 21.7%. However, as these static processes cannot be used cost-effectively in industry, special throughput processes are developed on systems with a substrate size of 30 x 30 cm² (see the chart on page 26, top centre). At ZSW, the entire process chain is implemented for the production of solar modules. The processes prepared in the throughput systems on a 30 x 30 cm² surface are thus capable of direct scaling to the industrially relevant substrate size of 60 x 120 cm² (see the chart on page 26, top right). In order to reduce costs further, current developments are aimed in particular at the throughput of the systems and thus at process speed in addition to increasing the efficiency of cell and module. Here, ZSW is carrying out fundamental pre-developments so as to accelerate later development in the industrial environment.



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

// Blick auf die Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage am ZSW.
// View of the roll-to-roll web coater at ZSW.

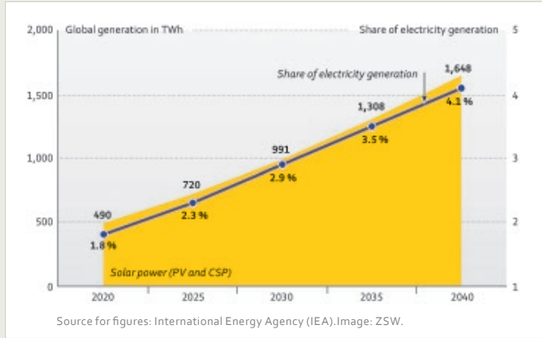
Ersetzt man das in heutigen Modulen gebräuchliche Substratmaterial Glas durch flexible Materialien wie Metall- oder Polymerfolien, so ist es möglich, CIGS-Zellen und -module mit der Rolle-zu-Rolle(R2R)-Technologie herzustellen (s. Grafik S. 27). Diese Technologie verspricht weitere Kostenvorteile. Hierfür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

Das ZSW deckt die gesamte Prozesskette der Photovoltaik von der Entwicklung neuer Materialien über die Begleitung von Industrieprozessen bis hin zur Qualitätsprüfung und Anwendung im Feld ab. Die Felddaten sind die Basis für weitere Modifikationen der Prozesse und dienen letztlich der Verbesserung der Produkte.

If one replaces the substrate material glass, customary in today's modules, by flexible materials such as metals or polymer films, it is possible to produce CIGS cells and modules with the roll-to-roll (R2R) technology (see the chart on page 27). This promises additional cost advantages. To this end, ZSW has a R2R system designed for films with a width of 30 cm which can produce complete solar cells in accordance with the "all-in-one" principle. A feasibility study is currently being carried out on this system with modified CIGS vacuum processes, in order to enable the preparation of a cost comparison to conventional technology based on process data.

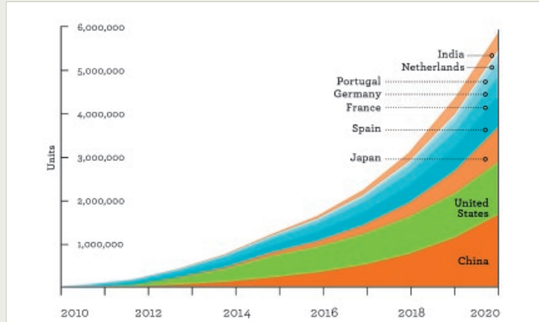
ZSW covers the entire process chain of photovoltaics, from the development of new materials via the accompaniment of industrial processes through to quality checking and application in the field. The field data form the basis for further modifications of the processes, and ultimately serve to improve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

// Focus



Source for figures: International Energy Agency (IEA).Image: ZSW.

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



Source: 2013 Global EV Outlook, OECD/IEA 2013

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

// Ausblick

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

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

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

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

// Outlook

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

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

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

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

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

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

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

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

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